

АНОТАЦІЯ

Кульматицький Ігор Васильович. Удосконалення організації роботи автомобільних вантажних тягачів для забезпечення аварійного буксирування трамваїв на транспортній мережі м. Львова. Магістерська кваліфікаційна робота. Національний університет ветеринарної медицини і біотехнологій ім. С.З.Гжицького.

В роботі досліджено процеси використання автомобілів-тягачів для аварійної евакуації для ремонту трамваїв в умовах громадського трнаспорту міста Львів. Зміст задачі полягає в тому, що вантажні автомобілі-тягачі повинні транспортувати трамвайний потяг по найближчому шляху, враховуючи завади, які цей автопоїзд може здійснювати для наявної мережі справних трамваїв. Також враховано, що по окремих ділянках мережі тягач може рухатись тільки збоку трамвайної колії, оскільки колія є непридатна для руху по ній автомобілів.

Ключові слова: евакуаційні автомобілі-тягачі, маршрутизація тягачів, тягова динамічність.

ABSTRACT

Ihor Vasylovych Kulmatytskyi Improving the organization of the work of truck tractors to ensure emergency towing of trams on the transport network of Lviv. Master's qualification work. S.Z. Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnology.

The work investigates the processes of using truck tractors for emergency evacuation for the repair of trams in the conditions of public transport in Lviv. The content of the task is that truck tractors must transport a tram train along the shortest route, taking into account the obstacles that this truck train can cause for the existing network of serviceable trams. It is also taken into account that on certain sections of the network the tractor can move only on the side of the tram track, since the track is unsuitable for the movement of cars on it.

Keywords: towing truck tractors, tractor routing, traction dynamics.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ СТАНУ ОПРАЦЮВАННЯ ПРОБЛЕМИ	10
1.1 Огляд питань щодо формування мережі електротранспорту.....	10
1.2 Огляд методів маршрутизації	12
1.3 Опис проблеми аварійності рухомого складу міського електротранспорту	16
1.4. Приклади задачі динамічної маршрутизації на практиці	20
1.5 Формулювання проблеми.....	22
2 АНАЛІЗ УМОВ ДЛЯ ВИБОРУ МАРШРУТІВ ДЛЯ БУКСИРУВАННЯ	23
2.1 Аналіз особливостей конструкції та експлуатаційних властивостей об'єктів евакуації.....	23
2.2 Визначення показників потоку відмов і надійності трамваїв	28
2.3 Аналіз заданої транспортної мережі	37
3 УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ РУХУ ТЯГАЧІВ.....	42
3.1 Характеристика рухомого складу ремонтно-евакуаційної служби	42
3.2 Методика динамічної маршрутизації.....	46
3.3 Результати дослідження	56
3.4 Розрахунок маршрутів за методом Кларка-Райта.....	61
4 ОРГАНІЗАЦІЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	66
4.1 Аналіз можливості впровадження.....	66
4.2 Постановка проблеми	66
4.3 Приклад впровадження.....	75
ВИСНОВКИ.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

ВСТУП

Транспорт у місті відіграє роль, подібну до кровоносної системи живого організму. Він забезпечує можливість життєдіяльності міста як цілісної системи з його адміністративними, культурними, виробничими та іншими функціями. Пасажирський транспорт задовольняє різноманітні потреби населення в пересуванні, відіграє значну роль у житті мешканців міста. Якість пасажирських перевезень впливає на психологічний та фізичний стан людей, продуктивність їх праці, відпочинок. Виходячи з цього, удосконалення організації пасажирських перевезень має важливе народногосподарське та соціальне значення. Аналіз стану міських пасажирських перевезень в місті Львів показав, що основними проблемами вдосконалення системи міських пасажирських перевезень є:

- недосконалість існуючої маршрутної мережі пасажирського транспорту;
- значне дублювання маршрутів електротранспорту і автобусних маршрутів;
- перевезення абсолютної більшості пасажирів здійснюється автомобільним транспортом в режимі маршрутного таксі і як наслідок цього велика частка пасажирських транспортних засобів у транспортному потоці та проблеми з перевезенням пільгових категорій пасажирів. нерациональне співвідношення між автобусами різної пасажиромісткості, які обслуговують міські автобусні маршрути;
- недостатня динаміка нарощування кількості автобусів великої та середньої місткості;
- недостатня кількість та оновлення рухомого складу електротранспорту, в першу чергу, тролейбусів;
- зниження безпеки та якості пасажирських перевезень;
- зростання кількості дорожньо-транспортних пригод;
- необхідність удосконалення системи сформованих економічних відносин на ринку послуг пасажирського автомобільного транспорту;

- необхідність удосконалення тарифної політики в галузі пасажирських перевезень;
- необхідність поліпшення екологічного стану в місті, зниження рівня забруднення навколишнього середовища.

Для забезпечення системного підходу до вирішення задач по вдосконаленню перевезень пасажирів в м. Львів розроблено концепцію розвитку пасажирського автомобільного транспорту. Концепцію розроблено на основі нормативно правових актів, що регулюють перевезення пасажирів в Україні. В Концепції визначаються шляхи розв'язання проблем подальшого вдосконалення виробничої системи пасажирських перевезень.

Концепцією пропонується створення в м. Львів маршрутної мережі пасажирського автомобільного транспорту, яка складалася б з наступних типів маршрутів:

- магістральні (основні) маршрути, які з'єднують великі пасажироутворюючі пункти зі сталим пасажиропотоком і проходять по вулично-дорожній мережі міста, що дозволяє безперешкодний рух автобусів великої місткості. Ці маршрути створюються, якщо пасажиропотік на них (обсяг перевезень пасажирів) є сталим і його величина встановлена згідно з методикою вивчення попиту населення на пасажирські перевезення дозволяє використовувати автобуси великої або середньої місткості з забезпеченням рекомендованих інтервалів руху; найбільш доцільно застосовувати на цих маршрутах звичайний та експресний режими руху; автобуси великої та середньої місткості;

- допоміжні (підвізні) маршрути – основним призначенням яких є перевезення пасажирів від пасажироутворюючих пунктів до магістральних (основних) маршрутів та маршрутів електротранспорту з метою забезпечення зручного пересування пасажирів транспортною мережею міста. Ці маршрути в більшості випадків призначені для з'єднання районів з малою щільністю населення, переважно приватної забудови, з основними

маршрутами; на них доцільно застосовувати звичайний режим руху; автобуси великої та середньої місткості;

- місцеві маршрути – перевезення пасажирів в межах окремих районів міста; найбільш ефективним для них є режим маршрутного таксі, автобуси середньої місткості та мікроавтобуси. - маршрути підвищеного комфорту – які з'єднують окремі райони міста переважно з малою щільністю населення (райони приватної забудови) з основними пасажиропотоками транспорту. Такі маршрути доцільно організовувати по дорогах які не використовуються для організації основних маршрутів системи міста, культурними, освітніми закладами, закладами охорони здоров'я тощо, найбільш ефективним є режим маршрутного таксі, автобуси середньої місткості та мікроавтобуси.

Мета роботи – забезпечити найвищу оперативність роботи автомобілів-тягачів, які використовуються для усунення аварійної ситуації на трамвайно-тролейбусній мережі м. Львова.

Об'єкти дослідження – процеси евакуації трамваїв і транспортних засобів, які блокують трамвайну мережу.

Предмет дослідження – вплив параметрів маршрутів автомобілів-тягачів при транспортуванні об'єктів, які блокують транспортну мережу громадського електротранспорту.

Завдання дослідження.

1. Дослідити параметри потоку відмов електротранспорту на мережі м. Львова
2. Обґрунтувати тягово-динамічні властивості автомобілів-тягачів
3. Розробити методику маршрутизації тягачів при виникненні кратних відмов міського електротранспорту.
4. Розробити рекомендації щодо вдосконалення конфігурації міської мережі пасажирського електротранспорту.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ОПРАЦЮВАННЯ ПРОБЛЕМИ

1.1 Огляд питань щодо формування мережі електротранспорту

Можна виділити три основних способи формування маршрутної мережі пасажирських перевезень електротранспортом у містах: емпіричний, евристичний та математична оптимізація [1].

Перший спосіб обмежений за кількістю альтернативних варіантів мережі, які можуть бути оцінені за розумний час. На противагу цьому способу, математична оптимізація, що базується на лінійному програмуванні або загальному цілочисельному програмуванні, приведе до побудови оптимальної мережі.

Математична оптимізація дає найкращий результат при побудові або проектуванні нових мереж пасажирських перевезень, або при вдосконаленні мереж які можуть бути змінені повністю. Однак в умовах коли маршрутна мережа не може бути змінена повністю результати математичної оптимізації не можуть бути реалізовані в повному обсязі та одноразово, що призводить до отримання результату який важко оцінити. Неможливість або недоцільність повної зміни маршрутної мережі може бути обумовлена, в першу чергу, наявністю маршрутів електротранспорту зміна або ліквідація яких недоцільна з економічної точки зору. Окрім того реалізація нової мережі за один етап у більшості випадків обмежена наявністю фінансових ресурсів а в окремих випадках навіть за їх наявності можливістю одномоментного придбання необхідного рухомого складу.

Евристичні способи «наводять міст» над розривом між системним аналізом за допомогою засобів інтерактивної графіки і способами математичної оптимізації. В евристичних алгоритмах використовуються систематичні процедури для формування й удосконалення маршрутної мережі. Хоча евристичні способи не гарантують одержання оптимальної мережі, але початкові умови й інші параметри можна змінювати так, щоб збільшити шанси на те, що реальний оптимум, який міг бути отриманий за

допомогою математичної оптимізації, був включений у діапазон розглянутих мереж.

При вдосконаленні маршрутної мережі пасажирського електротранспорту міста Львова використано спеціально розроблений евристичний алгоритм який дозволив врахувати існуючу мережу трамвайних та тролейбусних маршрутів та можливі зміни цієї мережі [7]. Розробка рекомендацій по вдосконаленню маршрутної мережі базувалась на результатах вивчення попиту населення на пасажирські перевезення, який попередньо був проведений.

При формуванні маршрутної мережі автори алгоритму виходили з наступного [3]:

- оскільки електротранспорт є найбільш екологічним і безпечним, то на напрямках перевезень пасажирів, де є маршрути трамваїв і/або тролейбусів, в першу чергу, враховувались їх можливості з урахуванням поповнення та оновлення рухомого складу;
- на автобусних маршрутах за наявності достатнього пасажиропотоку передбачалось використання автобусів великої та середньої пасажиромісткості, оскільки це дозволяє зменшити шкідливі викиди в атмосферу і кількість рухомого складу на дорогах міста, що в свою чергу буде сприяти зменшенню заторів і аварійності на дорогах;
- для забезпечення комфортності перевезень пасажирів інтервал руху на маршрутах не повинен перевищувати 12 хв.

Під час формування маршрутної мережі за розробленою імітаційною моделлю та програмним забезпеченням визначалась кількість та пасажиромісткість автобусів, необхідних для виконання наявного обсягу перевезень по маршрутам та забезпечення раціональних інтервалів в різних режимах руху і приймалось рішення про доцільність застосування експресного режиму руху на конкретних маршрутах.

Результатом впровадження маршрутної мережі є:

- збільшення обсягу перевезень муніципальним електро - та автотранспортом;
- підвищення соціальної та економічної ефективності діяльності муніципального транспорту;
- зменшення кількості автомобільних транспортних засобів, задіяних на пасажирських перевезеннях, що зменшить завантаження вулично-дорожньої мережі міста, особливо в центральній її частині;
- підвищення безпеки та культури перевезень;
- покращення екологічного стану, особливо в центрі міста;
- створення позитивних умов для подальшої оптимізації руху всіх видів транспорту в м. Львів, особливо в її центральній частині.

1.2 Огляд методів маршрутизації

Питанням маршрутизації транспортних засобів вчені приділяли увагу впродовж уже понад 50 років [32]. Задачі, які розв'язувались ними, поступово ускладнювались з метою наблизитись до реальних умов транспортування пасажирів та вантажів. В останні роки спостерігається зростання інтересу до задач динамічної маршрутизації, так само, як і складання он-лайн розкладів для операторів транспортного процесу [4]. Це пов'язано із зростанням обсягу доступних даних, водночас, удосконаленням засобів передачі та обробки інформації, яка стала рушійним фактором в організації керування процесом. Головним наміром дослідників є забезпечити надійні і достовірні розв'язки задачі маршрутизації, які змінюються в часі.

Застосування інформаційних і телекомунікаційних технологій перетворило методологію складання розкладів у вузьке місце, враховуючи випадкові фактори. Так, зокрема показано, що використання великої кількості сенсорів, розпаралелення процесу та впровадження хмарних технологій в керуванні транспортом значно збільшує потік інформації, яку

обробляють застарілими методами [5]. Тому прихід інтелектуальних технологій на транспорті стримується чинною методологією.

Загальний огляд формулювань різних задач маршрутизації був зроблений в публікаціях [6]. Маршрутизацію транспортних засобів відносять до задач комбінаторного аналізу і поділяють за доступністю й вірогідністю інформаційних потоків на статичну, динамічну і стохастичну. Статична маршрутизація була досить повно опрацьована в попередніх роботах, однак її розв'язування втрачають актуальність у зв'язку із переходом транспортних диспетчерів на оперативні методи контролю [7]. Крім того, чимало видів задач статичної маршрутизації не можуть бути розв'язані методами, які дають достатньо точне і ефективне рішення. На практиці, розв'язавши статичну задачу планування маршрутів і розкладів, перевізники все одно мусять застосовувати резервування провізних спроможностей парків транспортних засобів, а зустрівши непередбачені обставини, зазнають чималих економічних втрат. У сучасних виробничих ситуаціях відбуваються події, під час планування транспортного процесу, або тоді, коли цей план вже виконується. Питання про те, враховувати їх, чи ігнорувати, і як врахування нових подій вплине на якість попередньо прийнятого плану ще більш ускладнює задачу маршрутизації, приводить до більшої невизначеності. Тому виник клас задач динамічної маршрутизації, який ще називають он-лайн задачами реального часу, зміст яких полягає в корегуванні попередньо складеного оперативного плану відносно змінних обставин. Вперше такі задачі було сформульовано і зроблено їх початковий огляд в роботі Псарафтіс у 1988 році [7]. В роботах Larsen і Madsen [37], Jaillet and Wagner [4333], Schorpp (2010) and Pillac [39] запропоновано було різноманітні алгоритми розв'язування задач динамічної маршрутизації. Однак, усі вони застосовували методи, які раніше, зі змінним успіхом застосовувались до статичних задач. Це були методи найближчого сусіда [30], метод табу на окрему множину рішень [31], інші евристичні та метаевристичні методи, докладний огляд яких зроблено в праці [32].

У міру зростання потоку інформації методи динамічної маршрутизації з врахуванням фактору часу, а саме часових допусків, так званих часових вікон, запропоновані Larsen and Wagner стають менш ефективними. Це було вказано і в роботі [37], де показано, що зростання обсягу замовлень, які потрібно виконати, так і зростання незапланованого обсягу, коли процес уже виконується, ґрунтовно впливає на нові рішення. Розмір горизонту планування у цьому випадку вже не відіграє такої ключової ролі, як для невеликих обсягів замовлень і невеликих парків транспортних засобів. Тому дослідник запропонував застосовувати сортування замовлень з врахуванням терміновості їх виконання і витрат часу для цього. Також у роботах [33, 34], а також в роботах [35,36] було запропоновано оцінювати задачу маршрутизації та складання розкладу за ступенем динамізму. Це є оцінкою потоку позапланових подій по відношенню до запланованих. Вона може бути успішно використана для вибору відповідного алгоритму розв'язання.

Що стосується задач стохастичної маршрутизації, то вони, переважно, стосуються випадкових чинників, які приводять до непередбачених змін тривалості руху, простою та очікування. Достатньо повний огляд сучасних розробок у методології цього напрямку зроблено в праці [39]. В більшості випадків при наявності випадкових часових факторів, заплановані маршрути не змінюються, або не оновлюються після реалізації, тому стохастичну маршрутизацію часто називають апріорною оптимізацією.

Категорія динамічних і стохастичних задач динамічної маршрутизації призвела до збільшення наукових інтересів впродовж останніх років. Завдяки останнім досягненням інформаційних та комунікаційних технологій, цей новий клас проблем дозволяє більш точно обробляти реальні потоки даних. Перевагою є те, що крім ефективної обробки динамічних подій розглядається стохастичне знання про виявлені події. Flatberg et al. (2005) [43, 32] і Pillac et al. здійснили огляд задач такого змішаного типу, але основну увагу вони приділили, власне, динамічним задачам, тоді як Ritzinger та Puchinger (2013)

[36] дають огляд DSVRP, але з виключним акцентом на різних гібридних методах, застосованих до цієї царини.

Існує декілька підходів до класифікації алгоритмів комбінаторної оптимізації, які застосовуються при маршрутизації транспортних засобів. Основні класифікаційні ознаки – точність, тип простору розв'язків, структура обчислювальної схеми тощо [7]. Так за точністю алгоритми поділяються на точні, які знаходять глобальний розв'язок, наближені та евристичні алгоритми. Наближені алгоритми можна розділити на власне наближені алгоритми, які не лише знаходять розв'язок з певною точністю, а і дозволяють дати певні його оцінки, та евристичні алгоритми, які будуються на основі правдоподібних міркувань, хоча і не дають ніяких оцінок знайденому розв'язку [8]. Серед сучасних наближених оптимізаційних методів розв'язання задач дискретної оптимізації перспективним вважають метаевристичні. Метаевристика – це гібридний метод розв'язування задач шляхом такого комбінування відомих процедур, при якому одна виступає провідною, а інша (чи декілька інших) - як підпорядкована. У якості як провідної, так і підлеглих процедур зазвичай виступають деякі відомі евристики чи інші алгоритми. За складністю структури алгоритми оптимізації дискретних структур можна виділити прості алгоритми, гібридні алгоритми, метаевристики, гібридні метаевристики, гіперевристики.

У цій роботі розглядається проблема динамічної маршрутизації транспортних засобів і пропонується стратегія розв'язання, заснована на парадигмі системи колоній Ant. Метод був протестований на наборі тестів, які ми визначили, починаючи з набору широко доступних проблем. Результати обчислень підтверджують ефективність та ефективність запропонованої стратегії [8].

У чималій кількості робіт, зокрема в роботі [11] представлена методологія генетичного алгоритму для розв'язування моделі DVRP. Ефективність запропонованого алгоритму оцінюється з використанням набору показників, знайдених в літературі. У порівнянні з підходом для

пошуку табу, реалізованим у вищезгаданих роботах, автором запропонована методологія GA, яка краще виконує функції мінімізації витрат на поїздки. Однак, використання ГА потребує великого обсягу навчальних даних і їх застосування стримується необхідністю тренувальних циклів.

Огляд відомих публікацій показує перевагу адаптивних методів для DVRPSD у порівнянні з неадаптивними підходами. Якщо потік даних є попередньо обробленим, то такий підхід до прийняття рішень дає середнє поліпшення 0-5%, тоді як методи на основі RA отримують до 10% поліпшення. Однак підходи до онлайн-рішень виявляють найкращу вигоду [9].

Враховуючи виконаний огляд, можна стверджувати, що адаптація вхідних даних і групування їх є кращим напрямком у вдосконаленні алгоритму динамічної оптимізації маршрутів парку транспортних засобів і може забезпечити вищу якість розв'язку.

1.3 Опис проблеми аварійності рухомого складу міського електротранспорту

Впродовж 12 місяців 2024 року за участю трамвайних вагонів і тролейбусів підприємств міського електричного транспорту (МЕТ) сталося 7572 ДТП, в яких 30 осіб загинули та 276 отримали травми. З них з вини водіїв МЕТ сталося 267 ДТП, в яких 9 осіб загинули та 93 отримали травми.

За аналогічний період 2023 року сталося 1023/836 ДТП за участю МЕТ, в яких 23/21 особи загинули, а 233/210 отримали травми, з них з вини водіїв МЕТ сталося 320/277 ДТП, в яких 2/22 особи загинули, а 29/292 отримали травми.

Тобто, рівень аварійності на МЕТ з вини водіїв за 2024 рік порівняно з 2023 роком за абсолютними показниками щодо кількості ДТП становить - 16,6 %/ -3,6 %, +350 % щодо кількості загиблих та +221 % щодо кількості травмованих (рис.1.1).



*Рисунок 1.1 – Фото 2023, 2024 років: ДТП, яке сталося 05.06.2024 у м. Львів
за участю трамваїв (13 осіб травмовано)*

ДТП, яке сталося 23.04.2024 за участю трамваїв Татра-Т-3 (7 осіб травмовано) Аналіз ДТП за 12 місяців 2024 року у порівнянні з аналогічним

періодом 2023 року за видами транспортних засобів засвідчив наступне (рис.1.2):

- з вини водіїв тролейбусів сталося на 24,3 %/10,5 % менше випадків ДТП (212 ДТП у 2014 році проти 280/2372 ДТП у 2023 році), у яких на 700 % більше загинуло осіб (8 осіб проти 1) та на 168 % більше осіб отримали травми (51 осіб проти 19);

- з вини водіїв трамвайних вагонів сталося на 37,5 %/37,5 % більше випадків ДТП (55 ДТП у 2024 році проти 40/401 ДТП у 2023 році), у яких 1 особа загинула, як і в 2023 році, та на 320 % більше осіб отримали травми (42 особи проти 10).

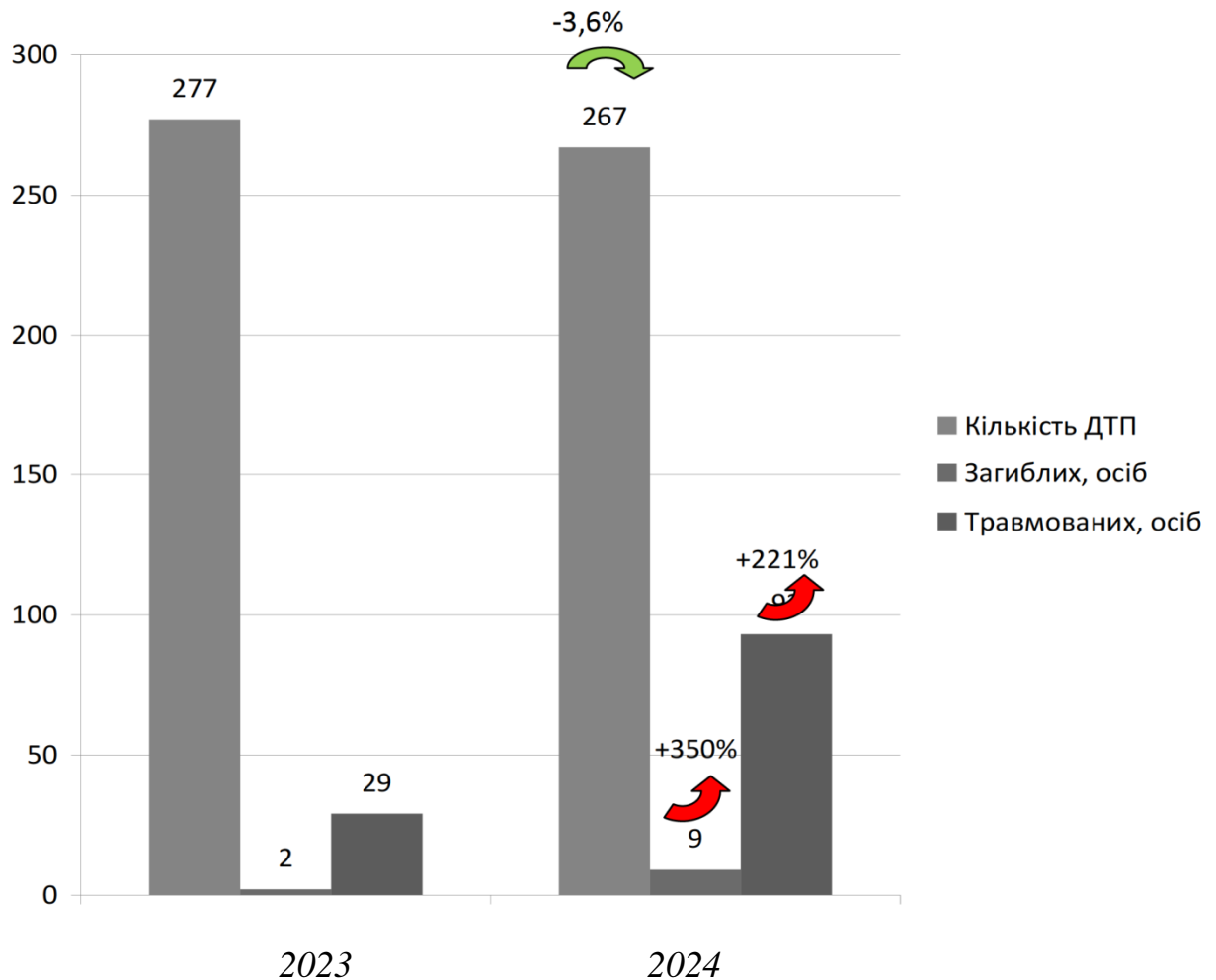


Рисунок 1.2 – Динаміка показників аварійності з вини водіїв трамвайних вагонів і тролейбусів в 2024 році у порівнянні з 2023 роком

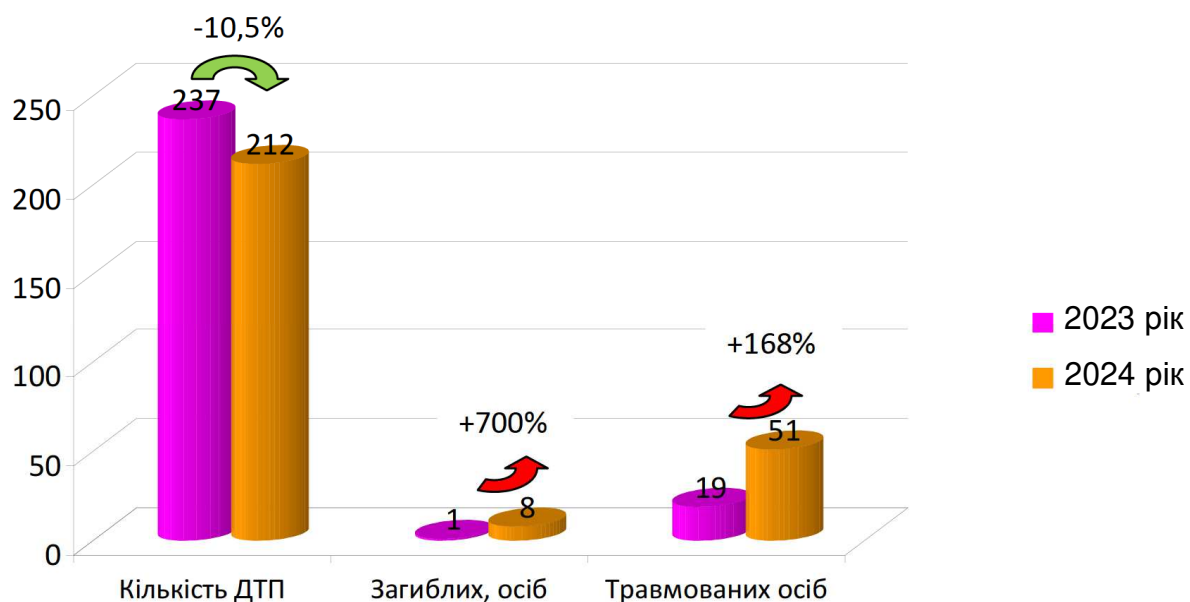


Рисунок 1.3 – Аварійність у 2023 та 2024 роках з вини водіїв тролейбусів

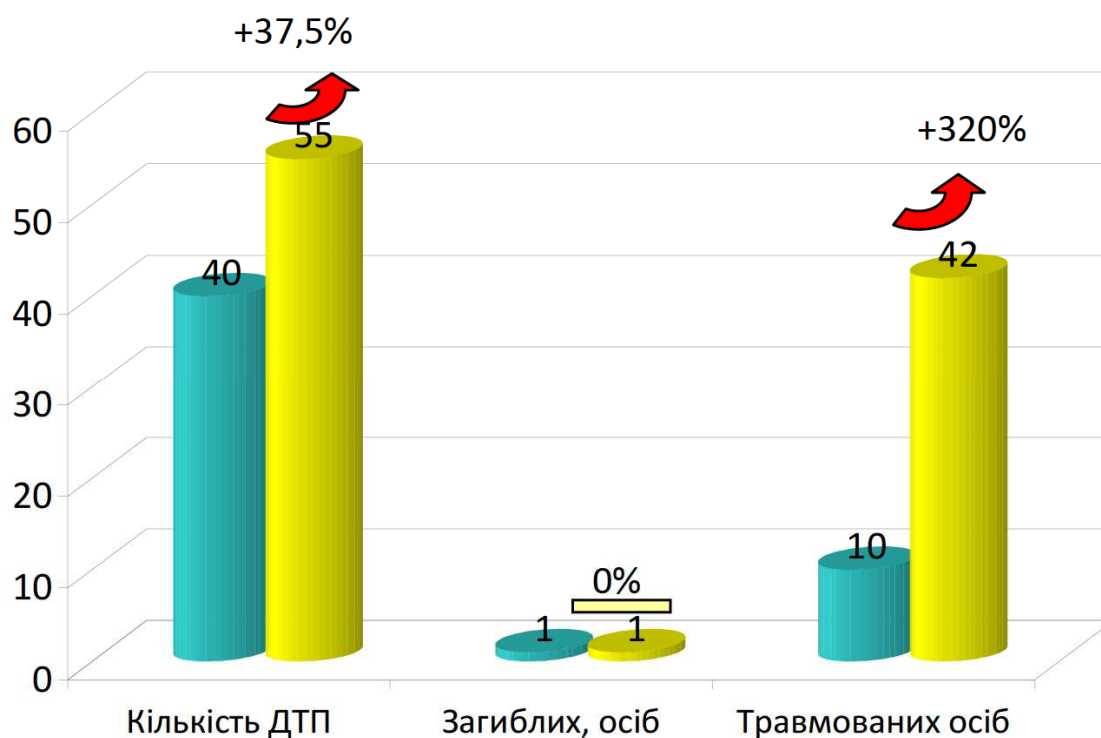


Рисунок 1.3 – Аварійність у 2023 та 2024 роках з вини водіїв трамвайних вагонів

Аналіз щодо загиблих у ДТП за територіальною ознакою засвідчив (рис.1.3-1.4), що у 2023 році 9 осіб загинуло у ДТП, 8 – з вини водія тролейбуса (з них 5 – у Донецькій області, по 1 – у Дніпропетровській,

Полтавській та Харківській областях), 1 – з вини водія трамвая (у Львівській області), тоді як у 2013 році 2 особи загинуло у ДТП (1 – з вини водія тролейбуса у Чернігівській області та 1 – з вини водія трамвая в Одеській області) [11]. Аналіз щодо травмованих у ДТП за територіальною ознакою засвідчив, що [14]:

- у 2024 році найбільшу кількість травмованих у ДТП допущено з вини водіїв рухомого складу МЕТ у м. Києві та Запорізькій області (по 19 осіб), Донецькій, Одеській та Чернігівській областях (по 10 осіб);

- у 2024 році у порівнянні з 2023 роком допущено збільшення кількості травмованих у ДТП з вини водіїв рухомого складу МЕТ у Запорізькій (з 6 до 19 осіб), Чернігівській (з 3 до 10 осіб), Волинській, Дніпропетровській та Рівненській (з 1 до 3 осіб) областях;

- найбільші питомі показники щодо кількості травмованих у ДТП на 100 одиниць рухомого складу у Чернігівській (8,6 травмованих на 100 ТЗ), Сумській (7,4), Запорізькій (6,7), Волинській (4,8) та Рівненській (4,2) областях.

1.4. Приклади задачі динамічної маршрутизації на практиці

Проаналізуємо декілька типових прикладів практичного застосування задачі динамічної маршрутизації [9].

1.4.1. Мандрівний ремонтник. Розглянемо ситуацію, яка виникає, наприклад, коли банківський касовий апарат ламається і його повинен ремонтувати технік з обслуговування. Маршрут, яким повинен слідувати технік, може бути визначений за допомогою цільової відстані, або він може брати до уваги терміновість виклику (банкомат розташований у зоні високої інтенсивності чи у віддаленій зоні?). Цю проблему часто називають «проблемою динамічного мандрівного ремонтника» і є однією з найбільш добре вивчених проблем динамічного маршрутизації транспортного засобу. Подібним прикладом є ремонтник з електроенергетичної компанії, який

подорожує від будинку до будинку, щоб усунути раптові збої в електропостачанні.

1.4.2 Послуги кур'єрської пошти. Компанії кур'єрської пошти по всьому світу пропонують забрати пошту та/або пакунки в одному місці та безпечно доставити товари в інше місце протягом певного терміну. Часто пошта/пакети, які потрібно доставити, не є місцевими, а доставляються з інших міст чи країн. Таким чином, поставки відправляються в центр, а потім розподіляються з цього центру до вантажівок. Доставка створює статичну проблему маршрутизації, оскільки всі одержувачі відомі водієві (і диспетчеру) до того, як АТЗ покине депо. Однак вибірка під час доставки має наслідком те, що проблема стає динамічною в тому сенсі, що водій і диспетчер не мають усієї інформації про те, коли та де мають відбутися самовивезення. Проблеми маршрутизації та відправлення при динамічному прийомі та доставці кур'єрської пошти та пакетів будуть досліджені більш детально в розділі 8 цієї дисертації.

1.4.3 Розподіл палива. Розподіл опалювального палива приватним домогосподарствам часто базується на так званих градус-днях, які є простою мірою накопиченої зовнішньої температури. Нафтові компанії використовують градус-день, щоб відстежувати, скільки палива споживачі витратили на опалення своїх будинків. Щоразу, коли база даних повідомляє системі маршрутизації, що у клієнта закінчується мазут, клієнт включається до пулу клієнтів, які очікують на обслуговування. Незважаючи на те, що клієнти на градус-день можна розглядати як статичних клієнтів, проблема маршрутизації часто стає динамічною через те, що у підмножини клієнтів може закінчитися нафта до того, як база даних на градус-день включить клієнтів у список поповнення. Причини такої ситуації можуть полягати, наприклад, в тому, що раптова зміна погоди спричиняє високе використання масла безпосередньо перед поповненням або загальне збільшення використання масла через зміни в поведінці клієнта (наприклад, коли будинок власника запрошує людей залишитися і тому повинен опалювати

приміщення, які зазвичай не опалюються). Досвід показує, що приблизно 20% клієнтів, яких відвідує нафтова компанія протягом дня, є динамічними клієнтами, які телефонують протягом дня з проханням негайного обслуговування. Іншим елементом, який робить цю проблему відмінною від звичайних статичних і детермінованих задач маршрутизації та значно складнішою для вирішення, є той факт, що градус-день не є точним показником фактичного використання мазуту, а лише оцінкою. Це означає, що проблема стає стохастичною по відношенню до попиту [20].

1.4.4 Динамічні системи Dial-A-Ride. Транспортні системи за телефоном є одним із застосувань загальної проблеми маршрутизації транспортних засобів для отримання та доставки, у якій один або кілька типів товарів потрібно забрати в одному місці та доставити в інше місце, де товари доставляються. Одним із прикладів динамічної системи dial-a-ride є перевезення людей похилого віку та людей з обмеженими можливостями.

1.5 Формулювання проблеми

У цій роботі необхідно вирішити кілька дуже актуальних питань. Нижче ми коротко обговорюємо три з цих питань, маючи на увазі, що необхідно розглянути кілька інших питань.

По-перше, слід вибрати метод маршрутизації.

По-друге, треба розглянути розподіли, які характеризують попит клієнтів і час обслуговування на місці в місцях розташування клієнтів).

По-третє, слід згадати час реакції системи. Це визначається як час, що минув між отриманням запиту та закінченням часового вікна, що визначає останній можливий час для початку обслуговування. Час реакції кожного клієнта можна розглядати як міру терміновості обслуговування цього об'єкта.

По-четверте, потрібно розглянути інформаційне забезпечення процесу маршрутизації.

2 АНАЛІЗ УМОВ ДЛЯ ВИБОРУ МАРШРУТІВ ДЛЯ БУКСИРУВАННЯ

2.1 Аналіз особливостей конструкції та експлуатаційних властивостей об'єктів евакуації

Першим міським транспортом є конка, візки з кінською тягою. Вони рухались по центру вулиці спочатку брукованої, потім покритої дерев'яним настилом, а пізніше металевими рейками [23]. Із появою перших парових двигунів у деяких містах вони змінили кінську тягу. Парова тяга була достатньо ефективною та у всіх країнах, на різних континентах будувались залізні дороги спочатку з паровозами, а пізніше з тепловозами. Нині парова тяга ще використовується в різних країнах, зазвичай у тепловозах. Проте для перевезення населення в містах паровози себе на виправдали. З появою джерел електроенергії та електричних двигунів кінська та парова тяга в містах була замінена електричною, виник вид транспорту – міський трамвай. Він прийшов на заміну паровозів та кінських екіпажів. Переваги електричної тяги проявилися з самого початку її використання. Це яскраво продемонстровано на прикладі київського трамвая, коли спроби використання кінської, а потім парової тяги для перевезення населення міста виявилися економічно не вигідними. Трамвай є найдешевшим видом транспорту. Він рухається по залізній колії. Трамвайні колії спочатку прокладались по центру проїжджої частини вулиці. З появою двигунів внутрішнього згорання й автомобілів вони зайняли центральну частину вулиці, а трамвайні шляхи зазвичай відокремлені від основної проїжджої частини вулиці. Перевагами трамваїв є те, що вони, на відміну від паровозів, мають великий початковий обертальний момент і дозволяють рухатись ТЗ із потрібним прискоренням. Обслуговування трамваїв суттєво простіше від обслуговування парових машин, а тим більше від коней, які використовувались у кінській тязі. Трамвай та інші види електричного транспорту є екологічно чистим видом транспорту, який не забруднює навколишнє середовище [16].

Особливостями трамвая як засобу міського електричного транспорту є те, що він здійснює перевезення населення територією міста на порівняно короткі відстані. Довжина трамвайних ліній $L = 15\text{--}30$ км, середня відстань між зупинками становить $D \approx 0,75$ км, частота руху від 10 одиниць у годину до 20 одиниць у

годину, а в час пік може досягати 40–50. Це вносить доволі високі вимоги до транспортних засобів. Для забезпечення достатньої швидкості сполучення на таких коротких ділянках шляху зупинки потрібно зменшити до 10–20 с. Тому конструкція трамвайних вагонів повинна передбачати достатню велику ширину дверей і малу висоту підлоги над рівнем дороги. Трамваї повинні мати достатньо велике прискорення на початку руху та в його кінці.

Режим руху відповідно діаграми такий: прискорення – вибіг – гальмування (рис. 2.1).

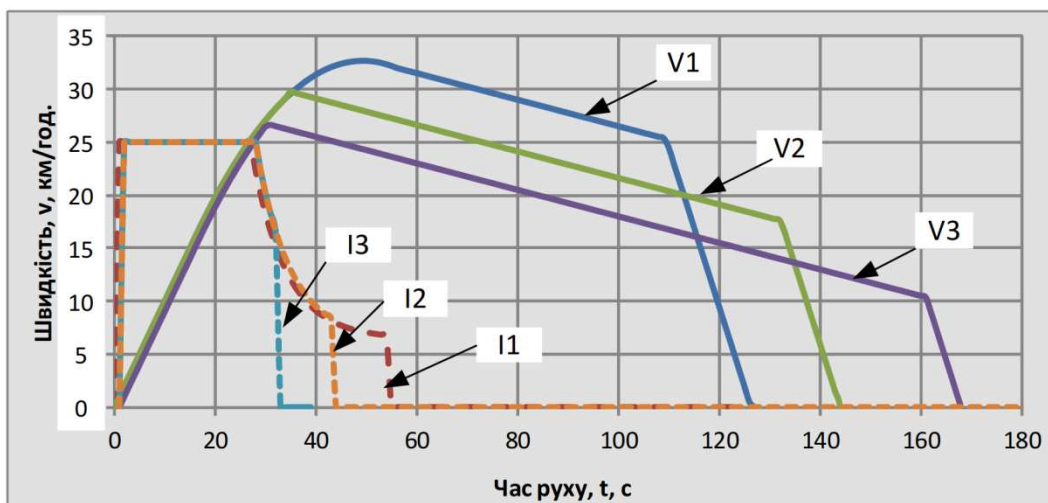


Рисунок 2.1 – Режими руху трамваю за різної тривалості руху: V1, V2, V3 – графіки швидкості; I1, I2, I3 – відповідні графіки струму

На рисунку 2.2 показано зміну швидкості й струму під час руху трамвая [10].

Як видно з графіків V1, V2, V3, тривалість руху з прискорення змінюється водієм. Трамвай набирає потрібну швидкість, у режимі вибігу рухається за інерцією та переходить у режим гальмування. Струм споживає тільки під час прискорення. Тривалість руху від одного до іншого зупинного пункту залежить від одержаної під час прискорення швидкості. Під час прискорення величина струму регулюється автоматикою та лишається практично постійною.

Зумовлена режимом руху, віддаллю між зупинками та тривалістю часу зупинок, розрахункова швидкість сполучення 14–18 км/год. За такого режиму руху електроенергія витрачається практично тільки на надання прискорення.

Сили опору відіграють незначну роль у витратах електроенергії. З умов експлуатації трамвая, як і інших засобів міського електричного транспорту, випливають вимоги до ТЗ. Вони полягають у тому, що трамвай повинен бути якомога легшим, а двигуни повинні забезпечувати максимально можливе прискорення як під час розгону, так і під час гальмування. Величина прискорення обмежена технічними причинами, а також комфортом пасажирів.

У випадку, коли більшість пасажирів стоїть, прискорення не може перевищувати $2\text{--}3 \text{ м/с}^2$. При зручному розміщенні пасажирів у кріслах прискорення може бути більше, що забезпечить більшу швидкість сполучення.

Трамваї зі швидкістю сполучення 24 км/год і більше вважаються «швидкісними». Під час експлуатації трамвая важливу роль має рекуперація електроенергії, яка під час гальмування на зупинках дозволяє суттєво зменшити витрати електроенергії. Крім трамвая, до міського електричного транспорту належить тролейбус і метрополітен.

Переваги трамвая є такі. Трамвай є найбільш екологічно чистим видом транспорту (за належного технічного стану та обслуговування). Оскільки трамвай зазвичай рухається по виділеному полотну від основної проїжджої частини вулиці, то під час його руху виникає менше перешкод і причин вимушеного гальмування, що суттєво впливає на витрати електроенергії. Із цієї причини трамвай може забезпечити більшу швидкість сполучення, ніж тролейбус і автобус. Він є одним із безпечних видів транспорту. Завдяки рейкам і відсутності горючих матеріалів трамвай є найбезпечнішим видом транспорту. Найбільше ДТП викликає автомобіль: автобус на 1 млн перевезених пасажирів створює в 40 разів менше ДТП, ніж особистий автомобіль, а трамвай – у 137 разів [9].

Рейки дозволяють трамваю їхати завжди в одному й тому самому габариті, йому не потрібні буферні зони. Тому для вузьких вулиць трамвай найкращий варіант. На звичайних вулицях трамваю потрібно менше площі, ніж автобусу та тролейбусу. Це дозволяє робити більше озеленення вулиць, ширші тротуари, велосипедні доріжки, паркування [12].

Перевагою трамвая є більша провізна здатність, ніж автобуса й тролейбуса. Оптимальне завантаження тролейбусного або автобусного маршруту не більше 3–4 тисяч пасажирів на годину, тоді як трамвай здатний перевозити до 7 тисяч пасажирів, а в певних умовах і більше. Це дозволяє суттєво розвантажити міські магістралі від великих транспортних потоків [13]. Трамвай масштабований, тобто до одного вагона можна приєднати ще декілька, які рухаються під керуванням одного водія. У такий спосіб зменшуються витрати на експлуатацію й збільшується пропускна здатність трамвайних маршрутів. У трамвая максимальна можлива провізна здатність серед усього міського транспорту. Можливо робити довгі багатосекційні трамваї, які майже не будуть уступати метрополітену. Для автобуса та тролейбуса це не реалізується. З'єднаний тролейбус – це все-таки один тролейбус, тільки інших габаритів, його роз'єднати не можна, до автобуса приєднати інший також не просто.

Система електропостачання трамвая пережила декілька модифікацій із використанням: підземних проводів, прокладених між рейками; третьої рейки для подачі електроенергії, повітряної лінії, пантографа та рейок для від'ємного полюса живлення. Використовувався також однофазний змінний струм зі стандартною частотою 50 Гц та із пониженими частотами 25 Гц, 16,7 Гц, 15 Гц.

Використовувалась різна напруга живлення: низька напруга 450–600 В, і навіть 150 В. Найбільш технічно зручною та най економнішою системою вважається живлення постійним струмом напругою 500–600 В з одним повітряним проводом. Така система використовується в більшості трамвайних систем у всьому світі. Коли трамваї стали поширеним і звичним ТЗ, контактна рейка залишилася лише в містах, де неможливо було провести контактну мережу.

У Франції в місті Бордо напруга до трамвайної лінії подається по третій рейці навіть на ділянках, де колія не відмежована від пішохідного та автомобільного руху. Третя рейка (насправді – дві близько розміщені рейки) розміщена посередині колії та поділена на секції по вісім метрів. Кожна секція є незалежною та ізолюваною від суміжних і напруга до неї подається лише тоді,

коли вона повністю закрита трамвайним вагоном. Це унеможлиблює контакт пішоходів чи домашніх тварин із рейкою та ураження їх струмом [16].

Особливостями використання тієї чи іншої системи електричної тяги є використання різних систем електричного живлення. Для електричної тяги в містах України використовується зазвичай струм постійної напруги 550 В.

Напруга на трамвай подається по електричному проводу, підвішеному над трамвайною лінією через пантограф. Від'ємний полюс приєднується до рейок за допомогою відсмоктувального кабелю. Для забезпечення живлення трамвайних ліній вздовж них розміщаються тягові станції, які зменшують напругу міської електромережі 10 кВ (6 кВ) і перетворюють у постійний струм потрібної напруги. Далі струм по кабелях передають на ділянки повітряної тягової мережі, а від'ємний полюс до рейки. Тягові підстанції розміщують на віддалі приблизно 2–3 км одна від одної.

Серед недоліків трамвая варто виокремити велику початкову вартість побудови транспортної інфраструктури: прокладання трамвайних ліній, контактної мережі, побудову тягових підстанцій. Проте ці додаткові витрати з часом експлуатації окупаються: зменшенням енергоспоживання на перевезення населення, спрощенням та здешевленням експлуатації, зменшенням втрат на обслуговування.

Недоліком трамвайних ліній в Україні є те, що більшість з них знаходиться в незадовільному стані й конструкція ліній не передбачає шумо- та вібропоглинання. Трамвайні лінії в Україні мають спрощену конструкцію, а це викликає вібрації, великі шуми та нарікання населення. У більшості міст трамвайні колії вимагають модернізації та належного технічного обслуговування. Якщо порівняти вітчизняні трамваї з трамваями європейських міст, то останні є одним із найтихіших видів транспорту. Їх практично не чути на міських вулицях. Навіть у випадках, коли трамвай майже безпосередньо проїжджає поряд із пішоходом, а вітчизняні надзвичайно шумні та їхня вібрація є однією із причин прискореного руйнування міських будівель. Зі студентських років запам'ятався трамвай біля студентського університетського гуртожитку в Львові, поряд із

поштою. О п'ятій годині ранку трамваї виходили на маршрути та своїм скрипом на повороті вулиці будили всіх жителів гуртожитку та навколишніх будинків.

Додатковим недоліком трамвайних ліній є виникнення блукаючих струмів, які негативно впливають на металеві підземні комунікації. Тому під час прокладання трамвайних шляхів потрібно забезпечити надійний захист підземних споруд від цих струмів, наприклад із використанням катодного захисту та інших методів. Як приклад можна навести харківські трамвайні лінії, побудовані у новому Олексіївському районі. На початку їхньої експлуатації всі підземні комунікації водопроводу, майже на протязі 10 років, зазнавали прискореного руйнування, аж до того часу, поки не був впроваджений належний захист від блукаючих струмів [26].

На жаль, у багатьох містах України з 1995 року почалося знищення трамвайних ліній та їхня заміна, наприклад: у Харкові – маршрутними таксі, а у Києві – тролейбусами й автобусами. Трамвайна мережа Києва стала розділеною на право- і лівобережну, у Харкові також майже розпалася на район Салтівки та відокремлений район Холодної гори та Залютіно. Після заміни трамвая на маршрутки, автобуси, тролейбуси, провізна здатність міського транспорту впала. Концепція екологічно чистої транспортної системи центру міста Києва (метрополітен + трамвай + тролейбус) перестала існувати. У Києві практично цілісної системи трамвайного транспорту не існує. Проектні документи допускають подальшу (30 %) ліквідацію трамвая. Водночас світові тенденції спрямовані на відновлення трамвая [36]. У різних країнах його географія розширюється. Є варіації: наземний вуличний, швидкісний, міжміський трамвай, система трамвай-залізниця. У Західній Європі їм відповідають: трамваї, міські поїзди S-Bahn, U-Bahn, мережа метро, електробуси.

2.2 Визначення показників потоку відмов і надійності трамваїв

З метою визначення числових характеристик розподілу випадкових величин (пробігів ТЗ на відмови, ресурсів чи термінів служби, тривалостей інтервалів між відмовами, тривалостей обслуговування чи ремонту тощо) застосовують

відповідну методику опрацювання зібраних, відповідним чином, масивів експериментальних даних. Ця методика передбачає в цілому (разом із узгодженням експериментальних розподілів з теоретичним імовірнісним законом) виконання наступних математико-статистичних процедур:

- за масивами дослідних даних складаються (будуються) варіаційні та статистичні ряди;
- за результатами розрахунків частостей (частот) у статистичних рядах будуються полігони чи гістограми розподілів досліджуваних випадкових величин;
- з допомогою статистичних рядів розраховуються числові характеристики розподілів експериментальних даних;
- за отриманими графіками та даними розрахунків висувається гіпотеза про підпорядкування емпіричного розподілу якомусь теоретичному імовірнісному закону;
- використовуючи відповідний критерій згоди (розрахунковий чи графічний) оцінюють ступінь розходження між емпіричним та гіпотетичним теоретичним розподілами;
- приймають або відкидають гіпотетичний теоретичний закон, за яким можна (не можна) описувати експериментальний розподіл досліджуваної випадкової величини.

Для кращого засвоєння цього матеріалу перших чотири пункти наведеної процедури розглянемо на конкретному прикладі. Нехай трамвайно-тролейбусне депо розміром 100 одиниць рухомого складу випускає щоденно на лінію для виконання транспортної роботи в середньому 95 одиниць трамваїв. Протягом півроку інженер служби експлуатації виконував цільові спостереження (з відповідним фіксуванням подій) за надійністю автомобілів на лінії. В результаті зібрано масиви статистичних даних про пробіги АТЗ, в яких відмовляли їх системи і агрегати. Необхідно визначити кількісні характеристики розподілу напрацювань /пробігів/ на відмови агрегатів і систем та побудувати гістограму і полігон цього розподілу та висунути гіпотезу про можливість підпорядкування

його якомусь із теоретичних законів. Масив пробігів трамваїв на їх відмови через втрату працездатності системи живлення такий (у тис. км):

287;247;275;250;253;310;245;328;330;338;281;247;291;265;254;321;358;366;254;
373;390;415;258;278;258;321;340;330;281;291;287;397;340;368;368;380;310;295;
317;295;300;340;345;350;300;317;300;352;340;300;290;291;321;380;281;321;281;
352;354;360;321;355;435;398;345;358;360;358;385;262.

Із заданого масиву пробігів транспортних засобів (ТЗ), L_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) складають варіаційний ряд, розташовуючи значення L_i у порядку їх зростання від мінімального $L_{\min}$ до максимального – $L_{\max}$:

242;245;247;250;253;254;254;258;258;262;265;275;278;281;281;281;281;287;287;290;
291;291;291;295;295;300;300;300;300;310;310;317;317;321;321;321;321;321;328;330;
330;338;340;340;340;340;345;345;350;352;352;354;355;358;358;358;360;360;366;368;
368;373;380;380;385;390;397;397;415;435;458.

Впорядковану послідовність пробігів на відмови ТЗ переформовують у статистичний ряд. З цією метою визначають:

а) кількість інтервалів статистичного ряду k , виходячи із величини вибірки (масиву) N за формулою Стерджеса

$$k = 1 + 3,22 \lg N, \quad (2.1)$$

практично k беруть у межах 5-9 (більші значення для вибірок $N > 25$); дробові значення заокруглюють до цілих чисел;

б) ширину інтервалів ΔL_k статистичного ряду, яка повинна бути однаковою для кожного з цих інтервалів:

$$\Delta L_k = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{K}. \quad (2.2)$$

Якщо ΔL_k дробове, його заокруглюють до цілого числа або залишають таким же (дробовим), заокруглюючи до другого або третього знаків, залежно від необхідної точності досліджуваної випадкової величини.

Отриману кількість інтервалів з шириною кожного ΔL_k розташовують у таблицю статистичного ряду (1-й рядок) (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Статистичний ряд розподілу пробігів на відмови трамваїв

Показники	Інтервали, k						Су- ма
	1	2	3	4	5	6	
Величина інтервалу, $L_{k\min} - L_{k\max}$, тис. км	240- 280	280- 320	320-360	360- 400	400-440	440- 480	-
Середина інтервалу, $\bar{L}_k$, тис. км.	260	300	340	380	420	460	-
Частота попадання поточних L_i в інтервал, m_k	14	20	25	10	2	1	72
Емпірична частість, p_k	0,194	0,278	0,347	0,139	0,028	0,014	1,000
$\bar{L}_{Bk} = \bar{L}_k \cdot p_k$	50,44	83,40	117,98	52,82	11,76	6,44	322,8
$(\bar{L}_k - \bar{L}_B)^2$	3948,9	521,7	294,5	3267,3	9440,1	18813	-
$D_{Lk} = (\bar{L}_k - \bar{L}_B)^2 p_k$	766,1	145,0	102,2	454,2	264,3	263,3	1995

При цьому кожний інтервал ряду повинен прилягати один до одного, тобто ряд – неперервний. Числові значення випадкової величини L_i розміщують у горизонтальних рядках таблиці (від 3-го до 6-го) навпроти кожного з інтервалів K . Другий рядок відведено для означення середин кожного із інтервалів $\bar{L}_k$.

Із попередньо складеного варіаційного ряду вибирають ту кількість значень пробігів автомобілів m_k , які належать кожному із k -х інтервалів статистичного ряду (третій рядок таблиці). Якщо значення пробігів АТЗ виявляться на межах k -х інтервалів, то їх зараховують у попередні $(k-1)$ -інтервали.

Маючи значення m_k (частоту попадання випадкової величини L_i у кожний k -й інтервал ряду), визначають емпіричну частість напрацювань L_i для кожного з k -х інтервалів – p_k (4-й рядок таблиці):

$$p_k = m_k / N. \quad (2.3)$$

Сума значень p_k повинна дорівнювати 1 або бути близькою до неї, якщо розрахунки заокруглені. Тобто,

$$\sum_{k=1}^k (m_k / N) = 1. \quad (2.4)$$

Цією сумою перевіряють правильність складеного статистичного ряду.

За значеннями середин інтервалів ряду $\bar{L}_k$ та емпіричних частотей p_k знаходять кількісні характеристики:

а) математичне сподівання пробігів на відмови агрегатів АТЗ на підставі вирахування спочатку добутків для кожного із інтервалів (5-й рядок таблиці)

$$\bar{L}_{вк} = \bar{L}_k \cdot p_k, \text{ тис. км}, \quad (2.5)$$

сума яких для усього статистичного ряду (усієї статистичної вибірки) становить це математичне сподівання

$$\bar{L}_в = \sum_1^k (\bar{L}_k \cdot p_k), \text{ тис. км}; \quad (2.6)$$

б) дисперсію (розсіювання довкола математичного сподівання) пробігів на відмови агрегатів АТЗ, вираховуючи спочатку добутки для кожного з k -х інтервалів (7-й рядок таблиці; 6-й підготовчий, розрахунковий)

$$D_{Lk} = (\bar{L}_k - \bar{L}_в)^2 p_k, \text{ тис.км}, \quad (2.7)$$

сума яких є власне дисперсією усієї вибірки

$$D_L = \sum_1^k (\bar{L}_k - \bar{L}_в)^2 p_k, \text{ тис. км}; \quad (2.8)$$

в) середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_L = \sqrt{D_L}, \text{ тис. км}. \quad (2.9)$$

7. Нерівномірність розподілу пробігів АТЗ L_i на відмови їх агрегатів оцінюють остаточно відносним показником – коефіцієнтом варіації v_L :

$$v_L = (\sigma_L / \bar{L}_в) 100\% . \quad (2.10)$$

У розгляненому прикладі:

$$N = \sum_1^k m_k = 72; \quad \bar{L}_в = \sum_1^k \bar{L}_k p_k = 322,84 \text{ тис. км};$$

$$D_L = \sum_1^k (\bar{L}_k - \bar{L}_в)^2 p_k = 1975 \text{ тис. км};$$

$$\sigma_L = \sqrt{D_L} = 44,7 \text{ тис. км}; \quad v_L = (\sigma_L / \bar{L}_в) \cdot 100 = 138,4\% .$$

Чим більше значення v_L , тим більшою нерівномірністю (нестабільністю) характеризуються моменти настання відмов на лінії. У такому разі інженерів технічної служби депо необхідно досконало вивчити організацію та технологію ТО і ПР, дорожні умови та режими їх роботи, відношення до них з боку водіїв та

інші чинники, які зумовили такий широкий розкид пробігів на відмови. Очевидно, що більшої уваги заслуговуватимуть ті автомобілі, у яких $L_i > \bar{L}_B$. Для наочної уяви про нерівномірність відмовних процесів на підставі статистичного ряду будують графіки емпіричного розподілу у вигляді гістограми (стовпчикової діаграми) або полігону (ламаних ліній, що проходять через точки поточних значень p_k) (рис. 2.1).

Ці емпіричні розподіли будуть потрібні дослідникові для узгодження їх з відповідними теоретичними законами розподілу випадкових величин, які у свою чергу кладуться в основу розрахунків таких важливих параметрів як завантаженість постів ТО і ПР; тривалість виконання цих робіт; обсяги запасних частин, обмінних фондів окремих агрегатів, груп деталей та приладів.

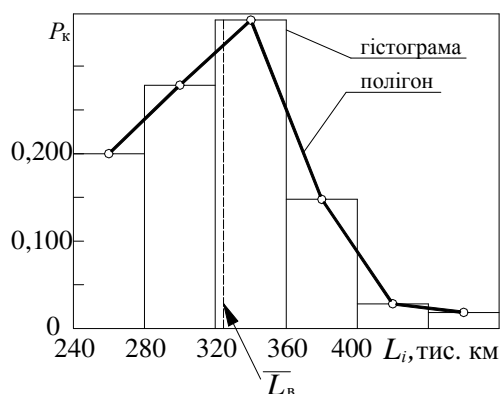


Рисунок 2.2 – Полігон та гістограма розподілу відмов трамваїв через відмови системи живлення

Відомо, що, якщо v – коефіцієнт варіації нерівномірності емпіричного розподілу випадкової величини є меншим, ніж 33% - висувається гіпотеза про підпорядкування його теоретичному нормальному законові; якщо ж $33\% \leq v \leq 88\%$ - гіпотеза про логарифмічно-нормальний чи про закон Вейбулла; в разі, якщо $v > 88\%$ – гіпотетичний закон розподілу експоненційний [14].

Для розглядуваного прикладу можна висунути гіпотезу про підпорядкування емпіричного розподілу пробігів на відмови теоретичному експоненційному законові.

Розглянемо приклад узгодження статистичного ряду розподілу пробігів автомобілів до їх поточного ремонту. За зібраними масивами пробігів ТЗ до поточного ремонту їх двигунів складено варіаційний ряд (у тис. км):

98;127;131;143;143;151;158;162;170;173;173;173;187;188;191;196;197;198;199;
200;203;204;207;217;218;222;222;226;228;228;229;240;241;242;244;252;252;254;
256;269;277;279;284;287;291;295;312;318;326;330;330;330;337;343;350;355;357;
357;364;370;380;386;390;445;463;470;479;501;522;546.

З варіаційного ряду пробігів формують статистичний (табл. 2.2), користуючись методикою визначення кількості інтервалів його, подібно до того, як було викладено вище.

Таблиця 2.2. – Статистичний ряд розподілу ресурсу ТЗ та узгодження його з теоретичним законом

Показники	Інтервали, k					Сума
	1	2	3	4	5	
Величина інтервалу, ΔL_k , тис. км.	50-150	150-250	250-350	350-450	450-500	-
Середина інтервалу, $\bar{L}_k$, тис. км.	100	200	300	400	500	-
Частота, m_k	5	30	20	9	6	70
Частість, p_k	0,0715	0,4285	0,2858	0,1285	0,0857	1,000
$\bar{L}_{opk} = \bar{L}_k p_k$	7,15	85,7	85,74	51,4	42,85	272,84
$(\bar{L}_k - \bar{L}_{op})^2$	29874	5306	738	16170	51602	-
$D_k = (\bar{L}_k - \bar{L}_{op})^2 p_k$	2136	2274	211	2078	4422	11121
Теоретична частість, p_k	0,126	0,335	0,328	0,154	0,048	0,991
$(p_k - p_k')^2 / p_k'$	0,023	0,026	0,005	0,004	0,033	0,0913

За отриманими даними розподілу по інтервалах статистичного ряду частостей p_k будують гістограму та полігон (рис. 2.3).

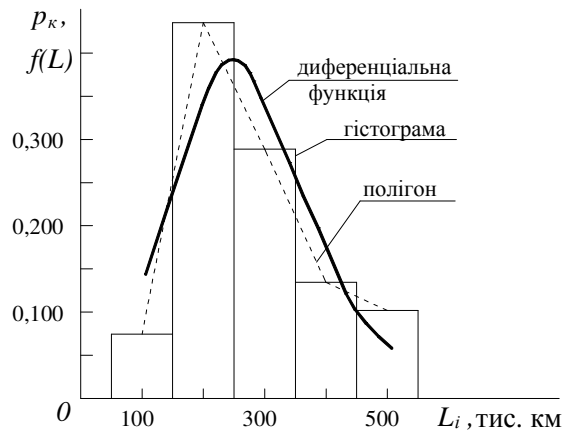


Рисунок 2.3 – Гістограма, полігон та теоретична крива розподілу доремонтного ресурсу двигунів АТЗ

Відомо, що зібрана дослідна інформація про показники надійності машин є деякою вибіркою з генеральної сукупності можливих їх значень. Тому статистичний ряд розподілу, разом з числовими характеристиками розподілу, містять відповідні похибки, пов'язані із збиранням початкової інформації. Цих похибок можна позбутися, якщо підібрати для опису розподілу показників надійності АТЗ і використовувати в подальшому теоретичний закон розподілу. Останній характеризує співвідношення між можливими значеннями випадкової величини, якою є у даному разі ресурс двигунів АТЗ, та їх імовірностями.

Для цього ряду:

$$N = \sum_{i=1}^k m_k = 70; \quad \bar{L}_{op} = \sum_{i=1}^k \bar{L}_k p_k = 272,84 \text{ тис.км};$$

$$D = \sum_{i=1}^k D_k = 11121 \text{ тис.км}; \quad \sigma_p = \sqrt{D} = 105,46 \text{ тис.км};$$

$$v_p = (\sigma_p / \bar{L}_{op}) \cdot 100 = 38,65\%$$

Суть підбору теоретичної закономірності полягає в узгодженні емпіричного розподілу випадкової величини з гіпотетичним теоретичним. Оскільки отримане значення коефіцієнта варіації $v_p = 0,387$ й вигляд полігону несиметричний, висувається гіпотеза про можливість описання емпіричного розподілу двопараметричним законом Вейбулла.

Параметри a і b знаходять залежно від значення коефіцієнта варіації v_p за спеціальними таблицями, використовуючи додатково коефіцієнти K_b та C_b . Якщо реальний коефіцієнт v_p відрізняється від табличного, то значення b , K_b та C_b вираховують, використовуючи метод інтерполяції. В даному разі $v_p = 0,387$ знаходиться між 0,365 та 0,428 [34].

Для цих значень коефіцієнти b , K_b та C_b дорівнюють:

b	K_b	C_b	v_p
2,5	0,887	0,380	0,428
x_1	x_2	x_3	0,387
3,0	0,893	0,326	0,365

Значення x_1 та x_3 знаходяться з використанням таких співвідношень:

$$\frac{0,428 - 0,387}{0,428 - 0,365} = \frac{0,380 - x_3}{0,380 - 0,326} = \frac{x_1 - 2,5}{3,0 - 2,5}.$$

Звідси
$$x_3 = 0,380 - \frac{0,041 \cdot 0,054}{0,063} = 0,345;$$

$$x_1 = \frac{0,041 \cdot 0,54}{0,063} + 2,5 = 2,825.$$

Отже, $b=2,825$, $K_b=0,890$ та $C_b=0,345$. Тепер можна визначити коефіцієнт a : $a=$

$$\frac{\sigma_p}{C_b} = \frac{105,46}{0,345} = 305,68 \text{ тис. км.}$$

Уточнене значення середнього ресурсу двигунів АТЗ становитиме:

$$\overline{L}_{op} = a \cdot K_b + L_{3M} = 305,68 \cdot 0,890 + 50 = 322 \text{ тис. км.}$$

Оскільки диференціальна функція побудована по середині інтервалів статистичного ряду, то поточні значення її визначатимуться за співвідношенням $\overline{L}_k/a$ та відповідно знайденим за спеціальними таблицями параметром $b=2,83$. Через те, що таблиці теоретичної диференціальної функції $f(L)=p_k$ не мають поточних значень b та $\overline{L}_k/a$, які вони набувають у даному прикладі, то шукані значення цих функцій знаходимо методом інтерполювання. Отримані результати теоретичної функції для кожного з інтервалів статистичного ряду з урахуванням зміщення, $L_{3M}=50$ тис. км. наведені у передостанньому рядку табл. 2.2. Числові значення відносних розбіжностей між емпіричною p_k та теоретичною p'_k

частотами у кожному з k -х інтервалів наведено в останньому рядку цієї ж таблиці

2.2. Сума його становить шукане значення χ^2 . Отже, $\chi^2 = 0,0913$.

Зважаючи на те, що закон Вейбулла є двопараметричним ($q = 2$), кількість степеней вільності у даному разі становитиме:

$$r = k - q - 1 = 5 - 2 - 1 = 2.$$

За спеціальною таблицею, на підставі значень χ^2 та r знаходимо, що імовірність узгодження експериментального розподілу ресурсу двигунів АТЗ з теоретичним законом Вейбулла становить $P(\chi^2) = 0,95$. Згідно із значеннями $f(L)$ побудовано відповідну теоретичну криву (див. рис. 2.16). Таким чином, висунена гіпотеза підтверджується і знайдена закономірність розподілу приймається як робоча для подальших розрахунків (визначення гамма-відсоткового ресурсу, імовірності того, що цей ресурс буде знаходитися у певних інтервалах пробігу АТЗ тощо) та вироблення і прийняття відповідних інженерно-технічних та організаційних заходів щодо підвищення експлуатаційної надійності АТЗ.

2.3 Аналіз заданої транспортної мережі

Схема трамвайних маршрутів у м. Львів подано на рис.2.4.

Визначаю відстані між заданими пунктами, скориставшись їх координатами по осі x (табл.2.3), та y (табл.2.4).

Таблиця 2.3 – Матриця відстаней по осі X

Літера		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		А	В	Д	Е	И	Й	К	Л	Н	О	Р	С
1	А		-0,2	-0,3	-0,5	-0,4	-0,3	0,0	0,1	0,3	0,2	0,4	0,3
2	В	0,2		-0,1	-0,3	-0,2	-0,1	0,2	0,3	0,5	0,4	0,6	0,5
3	Д	0,3	0,1		-0,2	-0,1	0,0	0,3	0,4	0,6	0,5	0,7	0,6
4	Е	0,5	0,3	0,2		0,1	0,2	0,5	0,6	0,8	0,7	0,9	0,8
5	И	0,4	0,2	0,1	-0,1		0,1	0,4	0,5	0,7	0,6	0,8	0,7
6	Й	0,3	0,1	0,0	-0,2	-0,1		0,3	0,4	0,6	0,5	0,7	0,6
7	К	0,0	-0,2	-0,3	-0,5	-0,4	-0,3		0,1	0,3	0,2	0,4	0,3
8	Л	-0,1	-0,3	-0,4	-0,6	-0,5	-0,4	-0,1		0,2	0,1	0,3	0,2
9	Н	-0,3	-0,5	-0,6	-0,8	-0,7	-0,6	-0,3	-0,2		-0,1	0,1	0,0
10	О	-0,2	-0,4	-0,5	-0,7	-0,6	-0,5	-0,2	-0,1	0,1		0,2	0,1

11	P	-0,4	-0,6	-0,7	-0,9	-0,8	-0,7	-0,4	-0,3	-0,1	-0,2		-0,1
12	C	-0,3	-0,5	-0,6	-0,8	-0,7	-0,6	-0,3	-0,2	0,0	-0,1	0,1	

Оскільки задано координати транспортних пунктів, то довжини наявних доріг обчислимо за формулою:

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (2.11)$$

де i, j – транспортні пункти, між якими є дорога;

x_i, x_j, y_i, y_j – координати відповідних пунктів, км.

Знайдені таким чином довжини доріг подані в табл. 2.5.

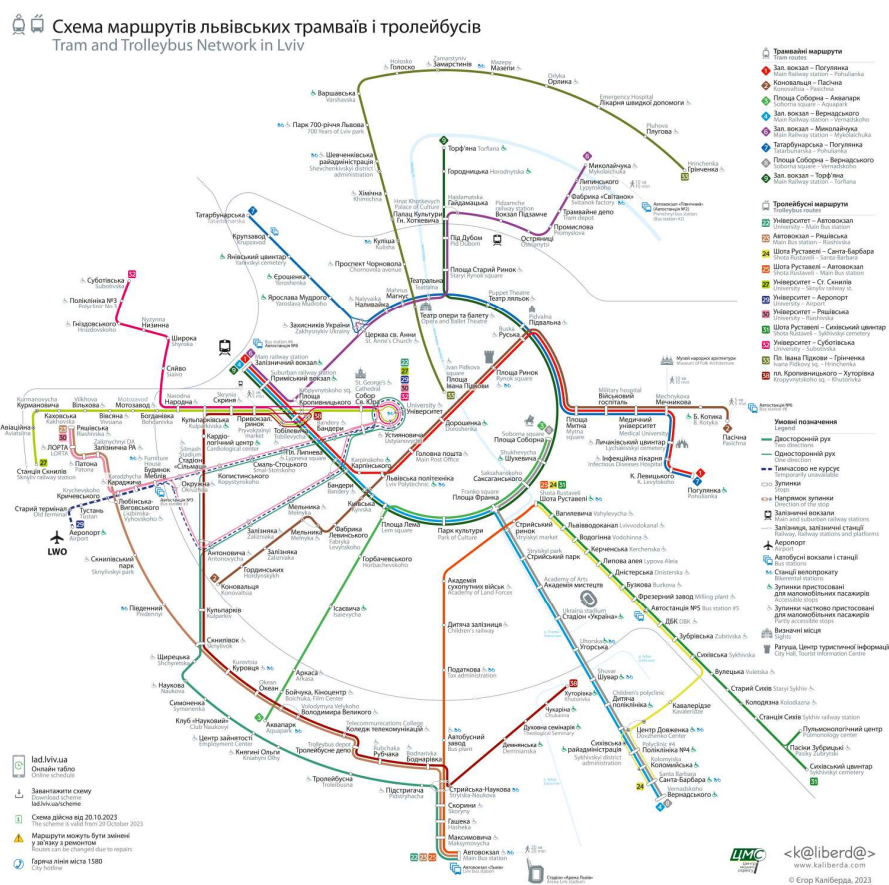


Рисунок 2.4 – Схема трамвайних маршрутів у м.Львів

Таблиця 2.4 – Матриця відстаней по осі Y

Літера		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		A	B	D	E	I	Й	K	Л	Н	O	P	C
1	A		0,2	0,1	-0,1	0,0	0,1	0,4	0,5	0,7	0,6	0,8	0,7
2	B	0,4		0,1	-0,1	0,0	0,1	0,4	0,5	0,7	0,6	0,8	0,7

3	Д	0,2	0,0		-0,3	-0,2	-0,1	0,2	0,3	0,5	0,4	0,6	0,5
4	Е	0,1	-0,1	-0,2		-0,3	-0,2	0,1	0,2	0,4	0,3	0,5	0,4
5	И	-0,5	-0,7	-0,8	-1,0		-0,8	-0,5	-0,4	-0,2	-0,3	-0,1	-0,2
6	Й	-0,3	-0,5	-0,6	-0,8	-0,7		-0,3	-0,2	0,0	-0,1	0,1	0,0
7	К	-0,3	-0,5	-0,6	-0,8	-0,7	-0,6		-0,2	0,0	-0,1	0,1	0,0
8	Л	-0,3	-0,5	-0,6	-0,8	-0,7	-0,6	-0,3		0,0	-0,1	0,1	0,0
9	Н	-0,2	-0,4	-0,5	-0,7	-0,6	-0,5	-0,2	-0,1		0,0	0,2	0,1
10	О	-0,5	-0,7	-0,8	-1,0	-0,9	-0,8	-0,5	-0,4	-0,2		-0,1	-0,2
11	Р	-0,6	-0,8	-0,9	-1,1	-1,0	-0,9	-0,6	-0,5	-0,3	-0,4		-0,3
12	С	-0,7	-0,9	-1,0	-1,2	-1,1	-1,0	-0,7	-0,6	-0,4	-0,5	-0,3	

Таблиця 2.5 – Матриця відстаней між відправником і споживачами

	А	В	Д	Е	И	Й	К	Л	Н	О	Р	С
*	0,32	0,42	0,41	0,60	0,57	0,63	0,41	0,40	0,36	0,61	0,76	0,82
А	#####	0,20	0,36	0,58	0,76	0,91	0,70	0,71	0,67	0,92	1,08	1,14
В	0,20	#####	0,22	0,42	0,71	0,91	0,73	0,76	0,78	0,98	1,17	1,21
Д	0,36	0,22	#####	0,22	0,50	0,73	0,58	0,64	0,72	0,86	1,06	1,08
Е	0,58	0,42	0,22	#####	0,45	0,72	0,64	0,72	0,85	0,92	1,14	1,13
И	0,76	0,71	0,50	0,45	#####	0,28	0,30	0,40	0,61	0,54	0,76	0,72
Й	0,91	0,91	0,73	0,72	0,28	#####	0,22	0,28	0,50	0,30	0,51	0,45
К	0,70	0,73	0,58	0,64	0,30	0,22	#####	0,10	0,32	0,28	0,50	0,50
Л	0,71	0,76	0,64	0,72	0,40	0,28	0,10	#####	0,22	0,22	0,42	0,45
Н	0,67	0,78	0,72	0,85	0,61	0,50	0,32	0,22	#####	0,32	0,41	0,50
О	0,92	0,98	0,86	0,92	0,54	0,30	0,28	0,22	0,32	#####	0,22	0,22
Р	1,08	1,17	1,06	1,14	0,76	0,51	0,50	0,42	0,41	0,22	#####	0,14
С	1,14	1,21	1,08	1,13	0,72	0,45	0,50	0,45	0,50	0,22	0,14	#####

Примітка. У клітинках таблиці, які відповідають одному пункту – $l_{ii}=#####$, що фактично означає відсутність замкнутих циклів у наявній транспортній мережі.

Сформуємо найкоротшу зв'язуючу мережу, вибравши найкоротший шлях, який починається в початковому пункті *, обходить усі задані пункти-споживачі і закінчується в пункті *. Для цього використано алгоритм лінійного програмування, який служить для розв'язання задач комівояжера [5]. Зміст алгоритму полягає в наступному. Розглянемо будь-які два пункти P_i і P_j транспортної мережі. Відстань між ними, згідно з табл.2.3, – $l_{ij}=\rho(P_i, P_j)$, якщо

вершини P_i і P_j з'єднані безпосередньою дорогою, і $l_{ij} = +\infty$, якщо вони не з'єднані. Кожному шляху, що проходить через пункти $i=1, K, j, K, n - \mu(P_i, P_{i2}, \dots, P_n)$ можна поставити у відповідність множину чисел ξ_{ij} , які дорівнюють одиниці, якщо відповідна дорога l_{ij} належить цьому шляху, і нуль – якщо не належить. У цьому випадку задача пошуку найкоротшого шляху полягає в пошуку матриці значень $\|\xi_{ij}\|$, з мінімумом лінійної функції:

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij} \xi_{ij} \quad (2.12)$$

$$\text{з обмеженнями} \quad 0 \leq \xi_{ij} \leq 1 \quad (2.13)$$

$$C1 = \sum_{j=1}^n (\xi_{ij} - \xi_{ji}) = 0 \quad i \neq 1, i \neq n, \quad (2.14)$$

$$C2 = \sum_{j=1}^1 (\xi_{1j} - \xi_{j1}) = 1 \quad (2.15)$$

$$C3 = \sum_{j=1}^n (\xi_{nj} - \xi_{jn}) = -1 \quad (2.16)$$

Для подальшого розв'язання складено табл. 2.6 і записано в неї початкові дані. В таблиця показано приклад пошуку найкоротшої відстані від пункту *, через усі пункти-споживачі – до пункту *. Таким чином, застосувавши алгоритм, знаходимо, що шлях, що утворює найкоротшу зв'язуючу мережу – це *-С-Р-О-Н-Л-К-Й-И-Е-Д-В-А-* (рис.2.5).

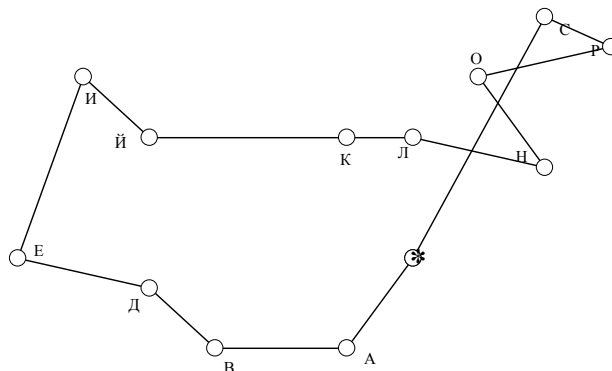


Рисунок 2.5 – Найкоротша зв'язуюча мережа

Таблиця 2.6 – Матриця чисел ξ_{ij} , які визначають шляхи найкоротшої зв'язуючої мережі

	А	В	Д	Е	И	Й	К	Л	Н	О	Р	С	**		
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
А	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
В	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Д	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Е	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
И	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Й	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
К	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Л	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Н	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
О	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Р	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
С	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		

Цю задачу розв'язано з допомогою прикладної програми *Solver* в електронних таблицях *Excel*. Для цього введено такі початкові дані:

- критерій – цільова комірка – обчислювалась за виразом (2.2) і фактично означає суму добутків;
- обмеження – величина $\sum_{j=1}^n (\xi_{nj} - \xi_{jn})$ для рядка з номером пункту, від якого шукається відстань повинна дорівнювати 1;
- обмеження – величина $\sum_{j=1}^n (\xi_{nj} - \xi_{jn})$ для рядка з номером пункту, куди приходить найкоротший шлях, повинна дорівнювати -1;
- всі інші величини виділеного стовпця таблиці 2.4 повинні дорівнювати 0;
- усі змінні ξ_{ij} повинні бути двійковими числами (приймати значення 0, або 1).

3 УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ РУХУ ТЯГАЧІВ

3.1 Характеристика рухомого складу ремонтно-евакуаційної служби

Буксирування трамваїв автомобілем зазвичай виконується спеціалізованою технікою (тягачами), оскільки трамваї дуже важкі; згідно з ПДР України (Пункт 23.2-23.4), буксирування автомобіля має бути на жорсткому зчепленні, якщо він не може самостійно повторювати траєкторію, трамвай не є звичайним автомобілем і вимагає специфічного обладнання та досвіду, щоб не пошкодити колію чи сам трамвай, тому це робота для професіоналів із спеціальними лебідками, штангами та буферами, які враховують його масу та габарити, хоча теоретично, для переміщення на дуже коротку відстань по прямій колії з мінімальною швидкістю, це можливо за допомогою дуже потужного тягача, але це вкрай рідкісні випадки, що вимагають дозволів та координації (рис.3.1).



Рисунок 3.1 – Буксирування трамвая на жорсткому зчепленні



Рисунок 3.2 – Автомобіль ремонтно-евакуаційний КрАЗ-6322-056

Автомобіль ремонтно-евакуаційний КрАЗ-6322-056 високої прохідності призначений для ремонту та евакуації пошкоджених автотранспортних засобів за всіма видами доріг, бездоріжжям та місцевістю.

Характеристики:

Базове шасі	КрАЗ-6322
Колісна формула	6x6
Двигун	дизельний з турбонаддувом
Повна маса автомобіля, кг	23000
Допустима повна маса буксированого причепа, кг	30000
Максимальна швидкість, км/рік	80

Обладнання:

- кран-гідроманіпулятор ІМ-150;
- дизель-генератор МД-10ТЕ;
- повітряний компресор ТМ66/100;
- пневмогайковерти;
- обладнання ацетилено-кисневого зварювання та різання металу;
- слюсарний стіл з лящатами та шліфмашинкою;
- комплект ключів та інструменту.

Чому це складно:

Велика вага: Трамваї важать десятки тонн, що значно перевищує можливості звичайного автомобіля.

Специфічне зчеплення: Потрібне спеціальне обладнання, а не просто трос, щоб не пошкодити буферні системи трамвая.

Колія: Обмеження руху по коліях вимагає особливих навичок.

Правила (щодо автомобілів, але ілюструють принципи):

Жорстке зчеплення (штанга): Рекомендується для автомобілів, що не можуть повторювати траєкторію, але трамвай взагалі не може з'їхати з колії.

Не більше одного ТЗ: Заборонено буксирувати багато транспортних засобів одночасно.

Технічний стан: Обидва транспортні засоби повинні мати справні зчіпні пристрої.

Висновок: Буксирування трамвая автомобілем — це нетипова процедура. Це може робити тільки спецтранспорт (тягач), який використовує потужні лебідки та спеціальні пристрої. Звичайний автомобіль не впорається і може спричинити аварію чи пошкодження колій.

Буксирування повинно виконуватися механічним транспортним засобом без причепа і з технічно справними зчіпними пристроями як у буксированого транспортного засобу, так і у транспортного засобу, що буксирує. Запускання двигуна із застосуванням жорсткого або гнучкого зчеплення повинно виконуватися згідно з вимогами цього розділу. Дозволяється буксирування одного механічного транспортного засобу лише з одним причепом.

Буксирування транспортних засобів здійснюється:

із застосуванням жорсткого або гнучкого зчеплення;

із частковим навантаженням буксированого транспортного засобу на платформу або на спеціальне опорне пристосування.

Жорстке зчеплення повинно забезпечувати відстань між транспортними засобами не більш як 4 м, гнучке – в межах 4–6 м. Гнучке зчеплення через кожний метр позначається сигнальними щитками або

прапорцями згідно з вимогами пункту 30.5 Правил (за винятком використання гнучкого зчеплення з покриттям із світлоповертального матеріалу). (№ 111 від 11.02.2013)

У разі буксирування механічного транспортного засобу на гнучкому зчепленні в буксированому транспортному засобі повинні діяти і бути справними робоча гальмова система і рульове керування, а на жорсткому зчепленні – рульове керування.

Буксирування механічного транспортного засобу на жорсткому або гнучкому зчепленні повинно здійснюватися лише за умови, що за кермом буксированого транспортного засобу перебуває водій (крім випадків, коли конструкція жорсткого зчеплення забезпечує буксированому транспортному засобу повторення траєкторії руху транспортного засобу, що буксирує, незалежно від величини поворотів).

Буксирування немеханічного транспортного засобу повинно здійснюватися лише на жорсткому зчепленні за умови, що його конструкція забезпечує буксированому транспортному засобу повторення траєкторії руху транспортного засобу, що буксирує, незалежно від величини поворотів.

Механічний транспортний засіб з рульовим керуванням, що не діє, повинен буксируватися відповідно до вимог підпункту «б» пункту 23.2 цих Правил.

Перед початком буксирування водії механічних транспортних засобів повинні узгодити порядок подачі сигналів, зокрема для зупинки транспортних засобів.

Під час буксирування на жорсткому або гнучкому зчепленні забороняється перевозити пасажирів у буксированому транспортному засобі (крім легкового автомобіля) та кузові вантажного автомобіля, що буксирує, а в разі буксирування способом часткового навантаження цього засобу на платформу або спеціальне опорне пристосування – в усіх транспортних засобах (крім кабіни транспортного засобу, що буксирує).

Буксирування забороняється:

а) якщо фактична маса буксированого транспортного засобу з несправною гальмовою системою (або за її відсутності) перевищує половину фактичної маси транспортного засобу, що буксирує;

б) на гнучкому зчепленні під час ожеледиці;

в) якщо загальна довжина зчеплених транспортних засобів перевищує 22 м (маршрутних транспортних засобів – 30 м);

г) мотоциклами без бокового причепа, а також таких мотоциклів, мопедів чи велосипедів;

г) більше одного транспортного засобу (за винятком випадків, коли порядок буксирування двох і більше транспортних засобів погоджено з уповноваженим підрозділом

д) автобусами. (№1029 від 26.09.2011).

Експлуатація составів транспортних засобів у складі автомобіля, трактора або іншого тягача і причепа дозволяється лише за умови відповідності причепа тягачу та виконання вимог щодо їх експлуатації, а состава транспортних засобів у складі автобуса і причепа – також за наявності причіпного пристрою, встановленого заводом-виробником. (№1029 від 26.09.2011)

3.2 Методика динамічної маршрутизації

Класично, динамічна маршрутизація полягає в тому, що впродовж деякого періоду T_{pr} зроблено прогноз замовлень на перевезення (буксирування) вантажів на заданій транспортній мережі. При відомих параметрах виконання замовлень складають розклад їх реалізації, тобто встановлюють моменти прибуття у пункт завантаження і розвантаження, враховуючи випадкове розташування парку автопоїздів на мережі. Якщо у плановому періоді замовлень є більше, ніж наявних автомобілів, то розклад повинен передбачати наступний пункт завантаження після виконання попередньої доставки вантажів. Маршрут кожного транспортного засобу планується в часі й з урахуванням ефективності роботи усього парку.

Застосовуються такі критерії оптимального розкладу як: мінімальна сумарна гарантована тривалість перевезення усіх вантажів (найчастіше – для вантажів, які швидко псуються), мінімальні витрати коштів на перевезення, максимальні грошові надходження. Але для міжміських великогуртових перевезень останнім часом використовують критерії мінімального пробігу та мінімального простою транспортних засобів. Магістральна транспортна мережа автомобільних вантажних перевезень є такою, що пункти відправлення одних вантажів можуть бути і пунктами призначення для інших. Це трапляється у випадкові моменти часу. Тому досить часто вантажівки довго простоюють в очікуванні можливих замовлень, уникаючи при цьому марного пробігу. Останні два показники для одного процесу не є суперечними. Якщо кількість і розмір планових перевезень на горизонті планування є сталими, то таку задачу вважають статичною. Її розв'язують уже згаданими методами математичного програмування, евристичними, або метаевристичними методами. Замовлення, які планується виконати, характеризуються пунктом відправлення і доставки вантажів. Тривалість виконання кожного із них є випадкова величина, яку оцінено математичним сподіванням $\bar{t}_i$ та відомим відхиленням. Також кожне замовлення має допустимі часові відхилення їх виконання – часові вікна. Межі часового вікна – $t_{b,i}$, найбільш ранній момент часу, до якого його неможливо виконати і $t_{e,i}$ – найбільш пізній момент часу, не пізніше якого це замовлення повинно бути виконане. Розмір часового вікна є, переважно, значно більшим, ніж максимальні відхилення часу виконання самого замовлення. Знайдені розв'язки статичної задачі раніше задовольняли диспетчерські служби перевізника за точністю і надійністю. На практиці максимальна кількість запланованих замовлень не перевищує 100-120, що дає змогу побудувати наближений до оптимального розклад з оцінкою його відхилення. Отже, попередній оптимальний розклад – це множина $t_1, t_2, \dots, t_n$, для N_a автомобілів, з яких у транспортному процесі задіяно кількість N_{a1} . Інші транспортні засоби є у резерві. Мінімальний час виконання проекту – T_1 , $T_{pr} > T_1$. При

виконанні проекту у деякий момент часу від нульового відліку $0 < t < T_{pr}$ виникають непередбачені обставини, серед яких можливі такі:

- a) надійшли нові замовлення з часовими вікнами, які перетинаються з горизонтом планування;
- b) відмінено прогнозоване замовлення;
- c) збільшився / зменшився прогнозований час транспортування t_{ij} , де i, j , відповідно, пункт відправки і приймання вантажу;
- d) транспортний засіб вийшов з ладу і зійшов з маршруту.

Наявність таких подій переводить статичну задачу маршрутизації в динамічну. Такі події мають випадковий характер і згідно з дослідженнями, підпорядковуються Пуассонівському закону [28]. Реакція на такі події перевізників може бути такою, що приймається, або відхиляється одне з можливих рішень:

- a) відмовити у виконанні нових замовлень;
- b) проігнорувати скасовані замовлення;
- c) змінити послідовність виконання замовлень;
- d) змінити кількість транспортних засобів на маршрутах, у тому числі, з врахуванням резерву.

У цій статті ми намагались вирішити два актуальні питання. По-перше, чи вплинуть зміни до попереднього замовлення на його якість, яка досягнута раніше? По-друге, як може вплинути на процес побудови/корекції оптимального розкладу і маршрутів наявність інформації про властивості планових та нових замовлень.

Формулювання задачі є таким. Задано плановий період T_{pr} , який можна змінювати залежно від бажаної дальності прогнозування. Є також відомою множина замовлень для автотранспортного підприємства $P = \{1, 2, \dots, p\}$, які потрібно виконати з мінімальними затримками часу одним, або декількома вантажівками з множини M_k , $k = 1 \dots m$, які спочатку періоду розташовані на транспортній мережі випадковим чином. Зміст кожного замовлення полягає в тому, щоб доставити унітарний гурт вантажів $q_{i,j}$ від деякого пункту g_i до

іншого g_j , $i, j = 1 \dots n$, $n < p$. Прийнято, що між будь-якими двома пунктами на заданій транспортній мережі існує шлях (мережа – сильно зв’язана), отже відстань між ними відома, але для зручності вона оцінюється опосередковано – часом руху $t_{i,j}$ при відомій сталій середній експлуатаційній швидкості. Оскільки задача стосується міських перевезень, то головним критерієм для перевізника тут, переважно, є максимальний пробіг з пасажиром впродовж заданого періоду. В даному випадку – це мінімальний час марних пробігів.

Оскільки тривалість $\bar{t}_i \leq T$, то впродовж планового періоду кожен з автомобілів може виконати декілька замовлень. Щоб розпочати перше з них, транспортний засіб потрібно подати в той пункт, де замовлення є сформоване не пізніше директивного моменту часу t_{ei} . Отже, потрібно врахувати тривалість нульових пробігів, а також час руху між i та j пунктами – $t_{i,j}$. Для виконання кожного наступного замовлення транспортний засіб потрібно подати для завантаження в сусідній транспортний пункт, де є відповідний запит, або ж завантажити у тому ж таки пункті, де відбулося попереднє розвантаження.

Особливостями даної задачі є те, що у ній відсутня конечна вимога виконання усіх замовлень множини P за період T_{pr} . Ця задача пов’язана з часовим впорядкуванням робіт (замовлень) і розподілом їх між наявними транспортними засобами. Тому її можна віднести за відомими класифікаційними ознаками до задач складання циклічних унітарних розкладів для потокового виконання операцій проекту декількома засобами [14]. Плануючи виконання перевезень, потрібно розробити, з одного боку, найкоротший за марним пробігом маршрут руху для кожного транспортного засобу, який буде задіяний в процесі, а з іншого – найкращий розклад виконання замовлень для сукупності автопоїздів з мінімальними непродуктивними простоями при наявності часових обмежень, тобто без затримок. Враховуючи структуру і властивості типового транспортного процесу у середніх і великих транспортних системах, таку задачу потрібно віднести до оптимізаційних [22]. За складністю алгоритму пошуку

оптимального розв'язку вона відноситься до NP складних задач у сильному змісті, тобто для неї існує недетермінований алгоритм пошуку успішного точного, або наближеного розв'язку за поліноміальний час [43]. Для його розроблення використано метод впорядкування змішаних графів [8]. Згідно нього, усю множину P відомих замовлень відображає орієнтований змішаний граф $A(G, U, V)$, де G – множина вершин, $\{g_1 \dots g_p\}$, в якій $g_2 \dots g_{p-1}$ символізують моменти початку їх виконання. Вершина g_1 – фіктивна, представляє формальний момент початку усього проекту. Вершина g_p – фіктивна, символізує кінець планового циклу тривалістю T_{pr} . U – множина дуг, кожна з яких відображає часовий зв'язок $a_{i,j}$ між моментами початку виконання i -го та j -го замовлення одним і тим ж транспортним засобом. Дуги графа A – зважені. Якщо існує замовлення, то воно відображається у графі A дугою ваги $a_{i,j} > 0$. При цьому повинна виконуватись вимога:

$$-a_{j,i} \leq t_{o,j} - t_{o,i} \leq a_{i,j}, \quad (3.1)$$

де $t_{o,j}$, $t_{o,i}$ – моменти початку виконання, відповідно, i -го та j -го замовлень.

Дуги $a_{1,i}$ – це найбільш ранні моменти можливого початку виконання кожного i -го замовлення. Кожна дуга $a_{i,p}$ – це часовий зв'язок, «чиста» тривалість виконання i -го замовлення так, що ніби транспортний засіб до початку завантаження перебував у i -му пункті уже, і на марний, чи нульовий пробіги не витрачено часу. Очевидно, що:

$$a_{i,p} \leq a_{i,j} \quad (3.2)$$

Умова (3.2) виконуватиметься для будь-яких i та j . Дуга з від'ємною вагою, $-a_{i,j}$ відображає часове обмеження для виконання замовлення. Наприклад, $-a_{p,1}$ – це дозволений час для виконання усіх відомих замовлень (як правило, він збігається з періодом T). Усі дуги $-a_{p,i}$ відображають директивні моменти найбільш пізнього закінчення i -х замовлень. Усі ж інші неіснуючі, або несуттєві зв'язки відображені дугами з вагою $-\infty$.

У моделі диз'юнктивного (змішаного) графа A задана, також, множина v – ребер, кожному $[i, j]$ з яких поставлена у відповідність пара ваг $a_{i,j}$, $a_{j,i}$.

Якщо між вершинами i, j є ребро, то це означає їх часову незалежність і відповідні операції по виконанню i -го та j -го замовлень виконуватимуться одночасно, або з частковим перекриттям у часі. До процесу перевезення може бути задіяно k транспортних засобів. Вони повинні працювати синхронно, кожен виконуючи по декілька замовлень послідовно. Це означає, що у графі A потрібно знайти k ланцюгів, які починаються у вершині g_1 , проходять через деякі вершини графа, які стосуються наявних замовлень і закінчуються у вершині g_p . У даному варіанті задачі шукаємо мінімальний марний пробіг з найменшими часовими затримками процесу. Тому шукані ланцюги мають проходити по тих вершинах, для яких $q_{x,y} > 0$. Якщо ланцюг доходить до вершини u , а далі нема жодного шляху у графі A з невід'ємною, або ненульовою вагою, то ланцюг при цьому прямує до вершини g_p . Задача в такому формулюванні є схожа на типову задачу декількох комівояжерів. Алгоритм розв'язування цієї задачі для відносно невеликої кількості замовлень базується на методі гілок і меж і його розроблення описано в попередніх дослідженнях [15]. Якщо розглянути деякий змішаний граф то зміст задачі полягає у заміні, або видаленні усіх його ребер і дуг, які спричиняють наявність контурів додатної ваги (рис. 3.1).

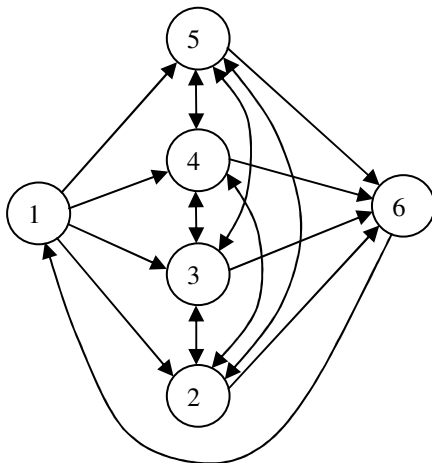


Рисунок 3.1 – Тестова модель складання розкладу виконання замовлень на перевезення вантажів:

$a_{i,j}$ – ваги відповідних дуг

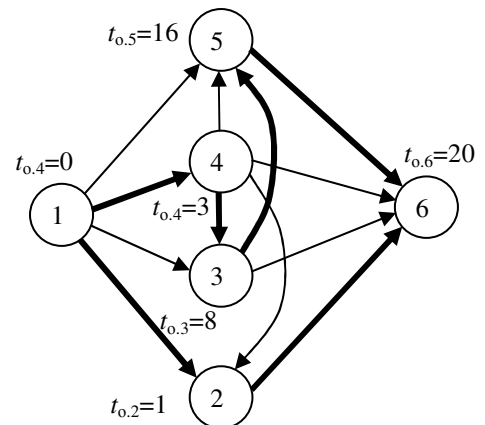


Рисунок 3.2 – Результати впорядкування змішаного початкового графа при наявності обмежень на директивні терміни завершення виконання замовлень,

кількість автомобілів $m=2$

Якщо замовлення є незалежні, то, насамперед, ребра є між кожною парою вершин. Тому складність алгоритму комбінаторного пошуку вимірюється кількістю варіантів перебору від 2^{2n-1} , де n – кількість вершин початкового графа. При 100 вершинах алгоритм тривалість виконання алгоритму перевищує допустимі сподівання і пошук повним перебором ускладнений. Тому застосовано евристику, яка базується на виразі і служить для вибору конфліктного ребра з усієї множини заданих:

$$h_{ij} = t_{e,j}(G, U) + \vartheta_j(G, U) + a_{i,j} - \vartheta(G, U) \quad (3.3)$$

де $\vartheta_j(G, U)$ – максимальна вага шляху в графі $A(G, U)$, що починається у вершині g_j ; $\vartheta(G, U)$ – найдовший шлях у графі $A(G, U)$. Вибираючи найконфліктніше ребро з усіх конфліктних множини $V(\alpha_i)$, керуємось величиною $\min(h_{i,j}, h_{j,i})$. Для якого ребра знайдена величина буде найбільшою, те й назвемо найконфліктнішим.

Впорядкування змішаного графа приводить до побудови орієнтованого (рис. 3.2), у якому нема контурів додатної ваги, і який однозначно представляє оптимальний за швидкодією розклад і маршрути, у даному випадку – для двох автомобілів. Біля вершин орієнтованого графа показано величини $t_{0,i}$ – моменти часу, коли має бути розпочато виконання i -ї операції.

Однак, коли кількість замовлень збільшується внаслідок додаткової оперативної інформації, то представлена модель буде містити тільки ребра, які пов'язують нові вершини з наявними. Тому оптимальне рішення буде локальним і якість нового розкладу може бути гіршою. Тому для удосконалення алгоритму ми застосували групування замовлень, яке виконується на основі запропонованої класифікації.

Для класифікації застосовано декілька ознак, окремі з них є більш суттєвими для впорядкування часової графічної моделі.

За частотністю відрізнятимемо одноразові, періодичні і постійні замовлення. Ця класифікаційна ознака стосується замовлень між сталими

двома пунктами, один з яких є відправником, інший споживачем вантажів. Одноразові виникають один раз за усі періоди планування. Періодичні відрізняються тим, що між моментами їх надходження існує час паузи, який є, в загальному випадку, випадковою величиною. Постійні замовлення характерні тим, що вони завжди існують у пункті відправлення вантажів, незалежно від моменту прибуття туди транспортного засобу під завантаження.

За сумісністю замовлення Z_1 і Z_2 поділятимемо на цілком сумісні, частково сумісні і несумісні. Цілком сумісними назвемо такі замовлення i, j , виконання яких у послідовності $i \rightarrow j$ одним транспортним засобом характеризується повною відсутністю марних пробігів і простоїв в очікуванні завантаження (рис. 3.3). Частково сумісними є такі замовлення, виконання яких приводить до необхідності марного пробігу і/або простою в очікуванні наступного завантаження (рис. 3.4). Несумісність замовлень означає неможливість їх виконання в одному потоці одним транспортним засобом. Несумісність замовлень Z_1 і Z_2 виключає їх виконання в одному потоці одним автомобілем через наявність часових вікон, які перекриваються. Моделі цілком сумісних і частково сумісних замовлень на перевезення показано на рис. 3, 4.

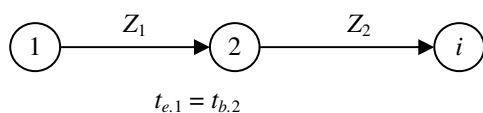


Рисунок 3.3 – Модель цілком сумісних замовлень

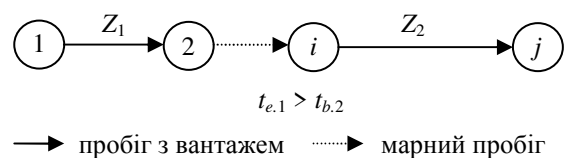


Рисунок 3.4 – Модель частково сумісних замовлень

Відношення сумісності, або часткової сумісності не є оберненим. Більш того, якщо позначити вказані відношення *com* – цілком сумісні, *inc* – несумісні, *pc* – частково сумісні, то можна записати наступні логічні вирази, які слідують з означень для замовлень a, b, d .

1. Якщо $a \text{ com } b$, то $b \text{ inc } a$.
2. Якщо $a \text{ com } b$, і $b \text{ com } d$, то $a \text{ pc } d$.

3. Якщо $a \text{ com } b$, і $a \text{ com } d$ то $b \text{ pc } d$.

4. Якщо $a \text{ pc } b$, і $a \text{ inc } d$, то $d \text{ pc } b$.

Це є початкові логічні залежності, на основі яких, використовуючи алгебру логіки, можна записати й інші логічні вирази, які поєднують замовлення у логістичні ланцюги.

Якщо замовлень, які можна включити в єдиний потік в загальній сукупності є декілька, то усю сукупність можна оцінити кількісними показниками, такими як:

- коефіцієнт сумісності замовлень, який визначаємо так

$$K_{com} = \frac{n_{com}}{n_{\Sigma}}, \quad (3.4)$$

де n_{com} – кількість сумісних замовлень (подій) в множині, які впорядковується, n_{Σ} – загальна кількість подій. Відповідно до означення сумісності, максимальне значення $K_{com}=0,5$. Тобто якщо максимум половина замовлень має сумісну другу половину, то це відношення не є дзеркальним;

- коефіцієнт часткової сумісності визначаємо з виразу:

$$K_{p.com} = \frac{n_{\Sigma} - n_{max.flows}}{n_{\Sigma}}, \quad (3.5)$$

де $n_{max.flows}$ – максимальна кількість потоків (з розривами), які можна побудувати в початковому графі. Числове значення коефіцієнта часткової сумісності може лежати в межах 0..1;

- коефіцієнт несумісності замовлень (подій) визначаємо з виразу:

$$K_{inc} = \frac{n_{inc}}{n_{\Sigma}}, \quad (3.6)$$

де n_{inc} – кількість несумісних подій у множині. Цей коефіцієнт може досягати максимального значення 1,0, оскільки замовлення можуть бути розташовані на мережі так, і затребуване тоді, що жодне з них не може бути виконано одним і тим ж автомобілем.

Використовуючи ознаки сумісності, можна ще на стадії складання початкового розкладу згрупувати замовлення в такі, які будуть виконуватись

в одному потоці. Повертаючись до попереднього прикладу статичної задачі, можемо відмітити на початковому графі дугами відношення повної сумісності між вершинами, або відсутністю дуги чи ребра – повної несумісності (рис. 3.5).

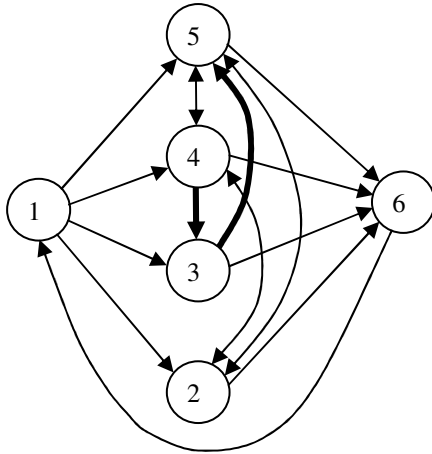


Рисунок 3.5 – Модель для складання розкладу із відміченими на ній відношеннями повної сумісності замовлень (суцільна потовщена стрілка)

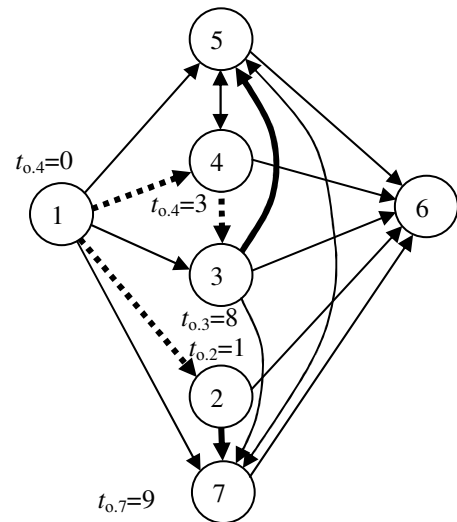


Рисунок 3.6 – Модель для коригування розкладу виконання замовлень після надходження незапланованого замовлення 7, кількість автомобілів $m=2$

Якщо порівняти дану на рис. 3.6 модель з початковою на рис. 3.5, то можемо помітити повну сумісність замовлень 4-3 і 3-5, а також несумісність замовлень 2-3 і 3-2. Таке групування значно спростило оптимізацію побудови розкладу і привело до того ж результату, що на рис. 2. Якщо кількість замовлень збільшиться, то можна припустити, що якість побудованого розкладу буде кращою, ніж при застосуванні описаного вище евристичного алгоритму без класифікації і групування об'єктів.

Якщо впродовж планового горизонту надходять незаплановані замовлення, то, враховуючи їх часові параметри, їх також можна класифікувати. Для того, щоб виробити оптимальне рішення про порядок виконання незапланованих завдань, потрібно знову побудувати

невпорядкований змішаний граф з врахуванням того, що у ньому вже будуть відсутні ребра, які з'єднували вершини, які у момент надходження нових замовлень уже є виключеними з поточного розкладу, бо події, які вони представляють, відбулись. Складність впорядкування нового графа не буде вищою, ніж попереднього, оскільки нові вершини мають встановлені зв'язки сумісності, а частина вершин вже є вилученими з розгляду. Розглянемо для прикладу приведену вище модель з чотирма замовленнями і двома автомобілями. Раніше вона була впорядкованою і мала вигляд, як на рис. 3.5. В момент часу $t_{0,7}=9$ год. від початку реалізації плану перевезень два автомобілі розпочали рух по мережі. Один з них в момент $t_{0,4}=3$ год. уже виконав замовлення 4 і відправлений до наступного пункту для виконання завдання 3, яке, згідно з розкладом, завершилось в момент $t_{0,3}=8$ год. Інший транспортний засіб виконав уже замовлення 2 і згідно попереднього розкладу мав би завершити план перевезень. Нове замовлення 7 за параметрами є цілком сумісним із замовленням 2. Тому наступна реоптимізація призводить до змін у розкладі, за якими другий автомобіль після виконання замовлення 2 має виконати нове замовлення 7. При цьому загальна тривалість проекту не збільшується, отже продуктивність обох автомобілів зростає.

3.3 Результати дослідження

Запропонований алгоритм було застосовано і для більшого масиву даних. На транспортній мережі, яка відображає місто Львів тобто розміром, приблизно 150×150 км, розглядались замовлення на перевезення вантажів між містами. Середня тривалість поїздки між зупинками становить $6,5 \pm 3,5$ год. Парк транспортних засобів (ТЗ) початково розташований в обласному центрі. Його чисельність становить 40 трамваїв. Такою ж є максимальна початкова кількість викликів. Іншими словами, є можливість розподілити наявні замовлення між наявним парком так, що кожен транспортний засіб буде зайнятий. Перевезення вантажів виконуються маятниковими маршрутами, однак, якщо пункт споживання і пункт відправлення вантажів

співпадає, то можлива версія кільцевого маршруту з розривом вантажопотоку. Максимальний горизонт планування становив 195 годин безперервного часу, тобто приблизно 8 діб. Кожне замовлення характеризується середньою тривалістю його виконання а також часовими вікнами. Таким чином, у множині замовлень були встановлені відношення сумісності між парами подій. Коефіцієнт їх повної сумісності становив $K_{com}=0,1$, часткової сумісності $K_{p.com}=0,5$, коефіцієнт несумісності – $K_{inc}=0,2$. Усі замовлення є періодичними і вони так розташовані на вказаній географічній території, що з усіх 44 зупинок в місті залучено 10, а з загальної протяжності доріг 31,5 тис. км для виконання усіх замовлень може бути використано, приблизно 20%. Упродовж планового періоду до перевізника надходять нові замовлення, які можна описати Пуассонівським процесом з інтенсивністю $\lambda=0,09$ замовлень за годину [12]. Нові вимоги на перевезення є такими, що вони не змінюють прийняті раніше показники сумісності. Приймалось, що обсяг перевезення відповідає вантажомісткості кожного з наявних транспортних засобів у парку.

Початкова оптимізація відомих замовлень виконувалась зі змінним горизонтом: 20...195 годин. Залежність кількості планових замовлень від тривалості прогнозування відображена на рис. 3.7. Ці дані отримано з транспортно-логістичного підприємства на основі відомості заявок.

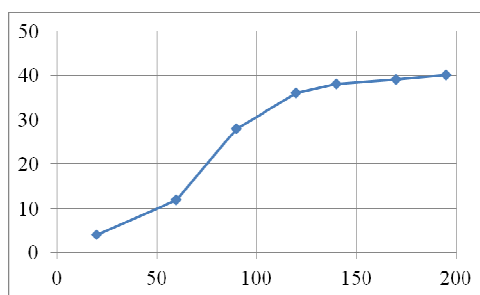


Рисунок 3.7 – Залежність кількості планових замовлень тривалості горизонту планування

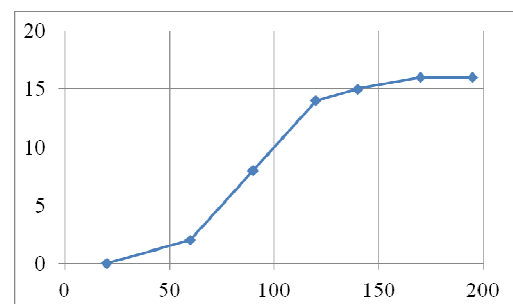


Рисунок 3.8 – Залежність кількості позапланових замовлень тривалості горизонту планування

Таблиця 3.1 – Показники якості побудованих динамічних розкладів при початковій плановій кількості відмов 40

Показник, одиниця вимірювання	Методика побудови		Рівень нового алгоритму, %
	гілок і меж, без класифікації замовлень	гілок і меж з попередньою класифікацією замовлень	
Горизонт планування, годин	195	195	0,0
Кількість фактично виконаних планових замовлень	33	36	+9,1
Кількість фактично виконаних незапланованих замовлень	14	16	+14,3
Кількість фактично задіяних автомобілів	38	36	-5,3
Мінімальна гарантована тривалість проекту, годин	22,2	19,5	-12,2
Тривалість пробігу усіх автомобілів, годин	312	346	+10,9
Тривалість марного пробігу усіх автомобілів, годин	112	94	-16,1
Тривалість простою усіх автомобілів, годин	84	47	-44,0

Таблиця 3.2 – Показники якості побудованих динамічних розкладів при початковій плановій кількості замовлень 36

Показник, одиниця вимірювання	Методика побудови		Рівень нового алгоритму, %
	гілок і меж, без класифікації замовлень	гілок і меж з попередньою класифікацією замовлень	
Горизонт планування, годин	120	120	–
Кількість фактично виконаних планових замовлень	27	32	+18,5%
Кількість фактично виконаних незапланованих замовлень	12	14	+16,7%
Кількість фактично задіяних автомобілів	30	26	-13,3%
Мінімальна гарантована тривалість проекту, годин	22,2	19,5	-12,2%
Тривалість пробігу усіх автомобілів	265	246	-7,2%
Тривалість марного пробігу усіх автомобілів, годин	87	84	-3,4%
Тривалість простою усіх автомобілів, годин	24	17	-29,2%

Таблиця 3.3 – Показники якості побудованих динамічних розкладів при початковій плановій кількості замовлень 4

Показник, одиниця вимірювання	Методика побудови		Рівень нового алгоритму, %
	гілок і меж, без класифікації замовлень	гілок і меж з попередньою класифікацією замовлень	
Горизонт планування, годин	20	20	–
Кількість фактично виконаних планових замовлень	4	4	0
Кількість фактично виконаних незапланованих замовлень	0	0	0
Кількість фактично задіяних автомобілів	2	2	0
Мінімальна гарантована тривалість проекту, годин	19,6	19,4	-1,0%
Тривалість пробігу усіх автомобілів з вантажем, годин	30,2	30,2	0
Тривалість марного пробігу усіх автомобілів, годин	5,2	4,4	-15,4%
Тривалість простою усіх автомобілів, годин	1,4	1,2	-14,3%

Кількість випадкових замовлень, які надходять у відведений період планування показано на рис. 3.8.

При побудові розкладів і маршрутів з різним горизонтом планування властивості замовлень і розташування транспортних засобів у початковий момент залишались сталими. Це стосувалось їх часових вікон, середньої тривалості та інших.

У таблицях 3.1-3.3 подано результати оптимізації за двома методиками: при застосуванні запропонованої класифікації замовлень і групуванні їх, і за евристичним алгоритмом «гілок і меж» [6]. У першому випадку на початкову модель накладаються обмеження, але вони є такі, що приймаються завідома найкращі рішення. Як видно з результатів та їх порівняння запропонований алгоритм показує вищий рівень якості розкладів і маршрутизації. Це особливо помітно за показником непродуктивного простою транспортних засобів, який має місце внаслідок того, що виконання замовлення є неузгоджене в часі. Простої відбуваються тоді, коли транспортний засіб уже виконав попереднє замовлення, а наступне ще не може бути розпочате, або тоді, коли усі актуальні замовлення вже виконані, або розподілені, а нових немає. З трьох таблиць видно, що показник простою особливо актуальний при великому горизонті планування. При фактичній кількості 36 планових і 16 незапланованих замовлень застосування алгоритму з класифікацією дає до 44% зниження простою усіх транспортних засобів, які були задіяні в проекті. При меншому плановому горизонті 120 годин кількість фактично виконаних запланованих замовлень становить 32, а незапланованих – 14. Хоча обсяг виконання замовлень зменшився незначно, але у цьому випадку тривалість простою була скорочена не так багато – 29,2%. Це пов'язано, у першу чергу, з тим, що тривалість проекту в цілому не змінилась, отже алгоритм привів до ущільнення розкладу при незначному зменшенні фактично виконаних робіт. Зменшення планового горизонту не впливає суттєво на якість розкладу. Адже співвідношення періоду планування T_{pr} і гарантованої тривалості проекту становить 1:8,8 та 1:5,4, тобто прогнозований час перевищує проектний

щонайменше в 5,5 раз. Якщо проаналізувати дані таблиці 3.3, то тут стає очевидним, що алгоритм оптимізації з попередньою класифікацією є неефективним. Але у цьому випадку маршрутизація і складання розкладів – це, фактично, статичний процес, оскільки незапланованих замовлень немає.

Досліджено також вплив кількості залучених у процесі транспортних засобів на тривалість виконання фіксованої кількості замовлень (рис. 3.9). Серед замовлень є 40 планових і 12 – непланових. Якщо кількість транспортних засобів, які мають їх виконати, збільшити з 14 до максимальної 40 одиниць, то тривалість процесу зменшуватиметься, однак нелінійно. При дослідженнях встановлена умова, що усі 52 замовлення мають бути виконані. Як видно рис. 3.9, збільшення числа автомобілів понад 31 не приводить до скорочення тривалості проекту, оскільки роботи розподілятимуться між наявними автомобілями, а їх продуктивність зменшуватиметься.

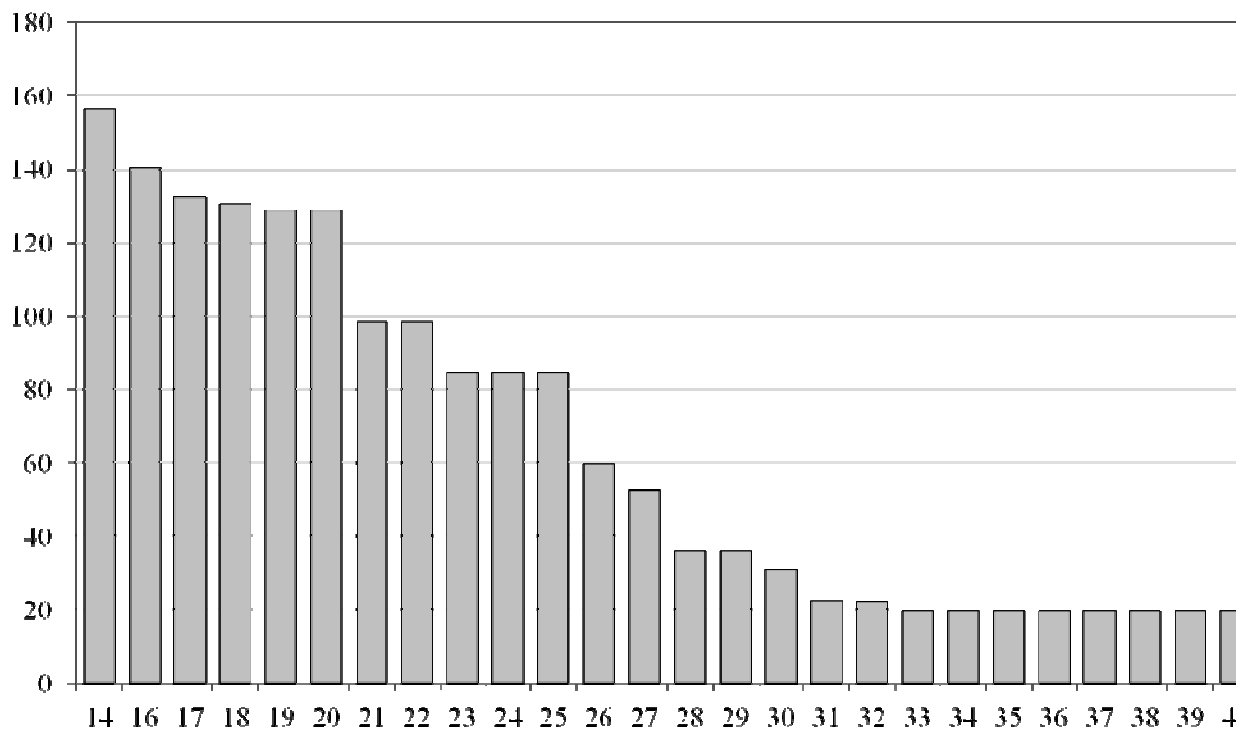


Рисунок 3.9 – Залежність мінімальної гарантованої тривалості проекту розміром 40 планових + 16 непланових замовлень від кількості задіяних транспортних засобів

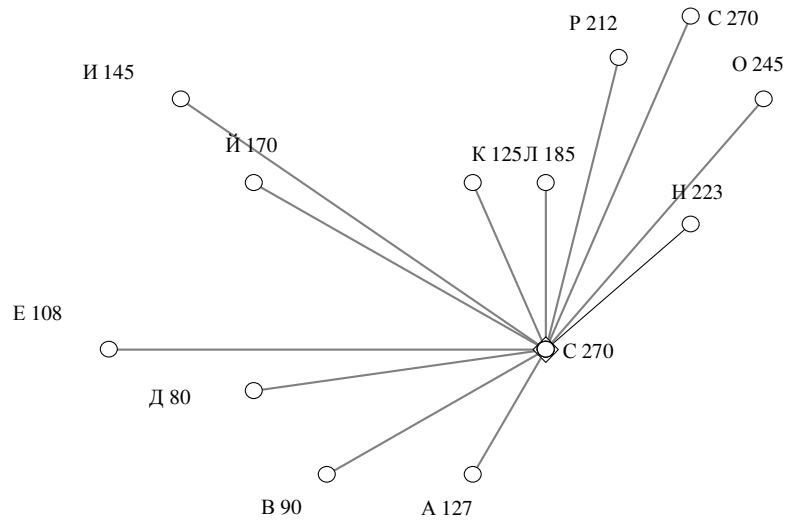


Рисунок 3.10 – Початкова транспортна мережа для розрахунку

Таблиця 3.4 – Існуюча транспортна мережа

Літера	*	А	В	Д	Е	И	Й	К	Л	Н	О	Р	С
$x, км$	0,8	0,7	0,5	0,4	0,2	0,3	0,4	0,7	0,8	1,0	0,9	1,1	1,0
$y, км$	0,6	0,3	0,3	0,5	0,6	1,2	1,0	1,0	1,0	0,9	1,2	1,3	1,4
$q, кг$	1980	127	90	80	108	145	170	125	185	223	245	212	270

3.4 Розрахунок маршрутів за методом Кларка-Райта

Перевагами методу є його простота, надійність і гнучкість, що дозволяє враховувати цілий ряд додаткових чинників, які впливають на кінцеве рішення задачі. Суть методу полягає в тому, щоб, відштовхуючись від початкової схеми доставки (див. рис.3.10), по кроках можна перейти до оптимальної схеми доставки на кільцевих маршрутах. З цією метою вводиться таке поняття, як покілометровий виграш, який обчислюємо за формулою:

$$s_{ij} = l_{*i} + l_{*j} - l_{ij}, \text{ км}, \quad (3.7)$$

де l_{*i}, l_{*j} – відстань, по маятникових маршрутах між оптовою базою * і пунктами i та j відповідно, км.; l_{ij} – відстань між пунктами i та j , км.

Маятникові маршрути використовуються в тих випадках, коли обсяг попиту у одержувача співставимий або навіть перевищує вантажність автомобіля.

Кільцеві маршрути використовуються в тих випадках, коли обсяг попиту істотно менше вантажомісткості автомобіля. В цьому випадку в кузовному відсіку транспортного засобу формується збірний вантаж, призначений відразу для декількох споживачів.

Для прикладу розрахуємо покілометровий виграш від об'єднання двох маятникових маршрутів: * – А – *, та * – В – *. Потенційний виграш при цьому становитиме: $s_{ij} = 0,32 + 0,42 - 0,20 = 0,54$ км. Усі інші отримані за формулою (3.7) значення заносимо в табл.3.4, де представлені потенційні покілометрові виграші з об'єднання усіх можливих маятникових маршрутів. Тепер, коли проведена вся необхідна підготовча робота, приступимо безпосередньо до рішення задачі. Скористаємося алгоритмом Кларка-Райта.

Таблиця 3.4 – Матриця потенційних покілометрових виграшів

	А	В	Д	Е	И	Й	К	Л	Н	О	Р	С
*	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
А	###	0,54	0,37	0,33	0,12	0,04	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
В	0,54	#####	0,61	0,60	0,28	0,15	0,11	0,06	0,00	0,05	0,02	0,04
Д	0,37	0,61	#####	0,79	0,48	0,32	0,24	0,17	0,05	0,16	0,11	0,16
Е	0,33	0,60	0,79	#####	0,72	0,51	0,37	0,28	0,11	0,29	0,22	0,29
И	0,12	0,28	0,48	0,72	#####	0,92	0,68	0,57	0,32	0,64	0,57	0,67
Й	0,04	0,15	0,32	0,51	0,92	#####	0,82	0,75	0,49	0,94	0,88	1,01
К	0,03	0,11	0,24	0,37	0,68	0,82	#####	0,71	0,46	0,74	0,67	0,74
Л	0,01	0,06	0,17	0,28	0,57	0,75	0,71	#####	0,54	0,78	0,74	0,78
Н	0,01	0,00	0,05	0,11	0,32	0,49	0,46	0,54	#####	0,65	0,71	0,69
О	0,00	0,05	0,16	0,29	0,64	0,94	0,74	0,78	0,65	#####	1,15	1,21
Р	0,00	0,02	0,11	0,22	0,57	0,88	0,67	0,74	0,71	1,15	#####	1,44
С	0,00	0,04	0,16	0,29	0,67	1,01	0,74	0,78	0,69	1,21	1,44	#####

Для виконання умови кроку 3 алгоритму [2] необхідно обчислити фактичну вантажність вибраних транспортних засобів.

Фактична вантажність автомобіля обмежена двома чинниками: номінальною вантажністю і об'ємом кузова. Для того, щоб її визначити для конкретного вантажу і конкретного автомобіля, потрібно знати об'ємну масу вантажу, яку визначаємо з довідника [1]:

$$M = Z \cdot V_k, \text{ т} \quad (3.8)$$

де M – максимальна маса вантажу в кузові автомобіля, т; V_k – максимальний об'єм вантажу в кузові, м^3 ; Z – об'ємна маса вантажу, т/м^3

Згідно із завданням перевезенню підлягають такі вантажі: - будівельні матеріали;- промислові товари; - продовольчі продукти; - овочі, фрукти; - горілко-лікерні вироби;- солодощі - хлібобулочні вироби;. Для заданих вантажів питомі маси становлять, відповідно – $Z=0,22; 0,19; 0,15; ; 0,18; 0,33; 0,46; 0,56. \text{ т/м}^3$. Найменша питома маса – $0,15 \text{ т/м}^3$, за якою проводимо наступні розрахунки.

Об'єм вантажного відсіку автомобіля КрАЗ65031: $2000 \times 1500 \times 2200 / 10^6 = 6,6 \text{ м}^3$.

Об'єм вантажного відсіку автомобіля IVECO DailyL 29L9: $2600 \times 1600 \times 2030 = 8,4 \text{ м}^3$.

Фактична вантажність автомобіля КрАЗ 65031, обчислена за об'ємом кузова: $q_f = 6,6 \times 0,15 \times 1000 = 990,0 \text{ кг}$.

Автомобіля IVECO Daily L 29L9: $q_f = 8,4 \times 0,15 \times 1000 = 1266,7 \text{ кг}$.

Коефіцієнт статичного використання вантажності визначається з виразу:

$$\gamma_c = \frac{q_f}{q_n} \quad (3.9)$$

де q_f – фактична вантажність, кг; q_n – номінальна вантажність, кг.

Для автомобіля КрАЗ 65031: $\gamma_c = 990,0 / 1350 = 0,7333$,

для автомобіля IVECO Daily L 29L9: $\gamma_c = 1266,7 / 1225 = 1,0340571$.

Кільцеві маршрути, які виконуватиме автомобіль КрАЗ 65031 показано на рис. 3.11, автомобіль IVECO Daily L 29L9 – рис.3.12.

Ефективність оптимальної маршрутизації буксирування та продуктивність використання транспортних засобів

У роботі обчислювались такі параметри.

Годинна продуктивність автомобіля-тягача (т/год) [1]:

$$W_Q = \frac{q_H \cdot \gamma_c \cdot V_t \cdot \beta_e}{l_e + t_{np} \cdot V_t \cdot \beta_e} \quad (3.10)$$

де V_t – середня технічна швидкість автомобіля, км/год.; β_e – коефіцієнт використання пробігу; t_{np} – тривалість навантажувально-розвантажувальних робіт, год. в т·км/год [1]:

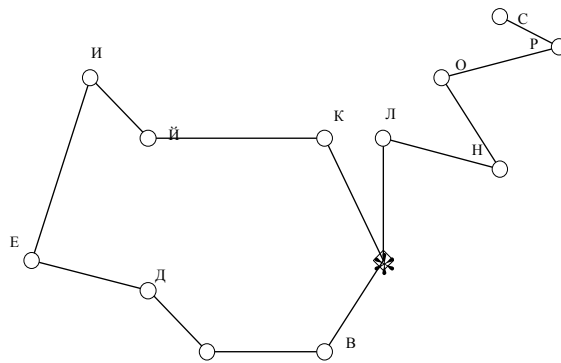


Рис.3.11. Кільцеві маршрути, які виконує автомобіль КрАЗ 65031

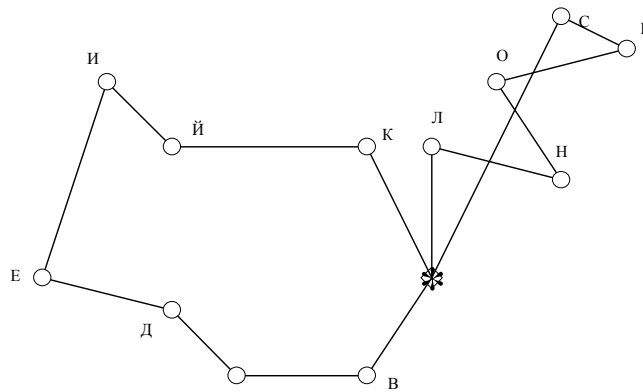


Рис.4.2. Кільцеві маршрути, які виконує автомобіль IVECO Daily L 29L9

Коефіцієнт використання пробігу

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{Z_e} 1_{Bi}}{\sum_{i=1}^{Z_e} (1_B + 1_{MX})_i} \quad (3.11)$$

Сумарний час простою автомобіля під навантаженням та розвантаженням за виконання маршруту, вибираю з довідкових даних згідно з типом вантажу і способом навантаження-розвантаження. Так, оскільки вантажність автомобілів – до 17 т, то норма часу на його навантаження для поштучних вантажів становить 15 хв. + 15 хв., для немеханізованих способів. Стільки ж часу – для розвантаження. Отже, загальний час вантажних робіт становитиме 1 год.

Середня технічна швидкість приймається з нормативів – 22 км/год.

Результати обчислень подано в табл.3.5.

Таблиця 3.5

Параметри ефективності тягачів

Показник	Автомобіль	
	КрАЗ 65031	IVECO Daily L 29L9
Номінальна вантажність, кг	8350	6225
Фактична вантажність, кг	6990,00	5266,72
Коефіцієнт статичного використання вантажності	0,73	0,63
Коефіцієнт динамічного використання вантажності	0,22	0,14
Пробіг з вантажем, км	3,31	3,38
Середня довжина маршруту, км	4,4	4,1
Коефіцієнт використання пробігу	0,76	0,83
Пробіг без вантажу, км	11,0	17
Середня технічна швидкість, км/год.	12,00	22
Тривалість вантажних робіт, год.	1	1
Транспортна робота т-км	6561,0	6694,5
Перевезено на маршрутах, кг	2280	2160
Продуктивність		
т-км/год	0,823	0,481
т/год	0,826	1,068

4 ОРГАНІЗАЦІЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1 Аналіз можливості впровадження

Доведено, що за кордоном активно впроваджуються інтелектуальні системи управління та технології V2V і V2I, тоді як в Україні обмежуються збором статистики, системні зміни майже не впроваджуються, а демонтаж трамвайних колій суперечить міжнародному досвіду. Моделювання показало, що перенесення трамвайної колії на окреме полотно з регулюванням світлофорів знижує конфліктні точки, скорочує затримки, підвищує швидкість руху та мінімізує зупинки. Вирішальним фактором стало правильне місце перенесення колій. Результати можуть сприяти оптимізації трамвайної інфраструктури, підвищенню доступності та ефективності громадського транспорту.

Трамвайний рух, транспортний засіб, вулично-дорожня мережа, організація дорожнього руху, ефективність, аварійність, безпека, транспортний потік, дорожньо-транспортна пригода

4.2 Постановка проблеми

Небезпека дорожнього руху не обмежується лише аваріями. На дорогах часто виникають конфліктні ситуації між учасниками руху, що можуть бути спричинені різними поведінковими реакціями: стресом, агресією, провокаціями та, як результат, втратою контролю. Найбільша кількість транспортних конфліктів спостерігається у великих містах, де є висока інтенсивність руху.

Одним з головних критеріїв ефективної роботи дорожньої мережі є забезпечення безпечного і безконфліктного співіснування всіх учасників руху в обмеженому просторі. Питання безпеки дорожнього руху особливо актуальні в Україні, де офіційна статистика патрульної поліції свідчить про тенденцію до щорічного погіршення ситуації на дорогах. Найбільшу загрозу безпеці та пропускній спроможності (ПС) дорожнього руху створюють

перехрестя, зокрема місця злиття та перетину транспортних потоків (ТП), де змінюється напрямок руху. Традиційне світлофорне регулювання вже не здатне забезпечити належний рівень безпеки та ПС. Тому виникає потреба в перегляді підходів до планування дорожньої мережі, впровадженні інтелектуальних транспортних систем (ITS) та інших сучасних методів організації дорожнього руху (ОДР) [1].

В Україні значна кількість наукових досліджень та практичних заходів спрямована на удосконалення вулично-дорожньої мережі (ВДМ), зокрема на покращення транспортних розв'язок, організацію світлофорного регулювання та впровадження координованого руху. Активно розробляються концепції адаптивного управління дорожнім рухом, оптимізації роботи світлофорних об'єктів та інтеграції ITS у міську інфраструктуру. Проте питання взаємодії трамвайного транспорту з іншими учасниками дорожнього руху залишається малодослідженим і фактично не регулюється на системному рівні.

На відміну від країн із розвинутою трамвайною інфраструктурою, в Україні майже не застосовуються заходи з підвищення безпеки, спрямовані на зниження конфліктних ситуацій між трамваями та автомобілями. Аналіз зарубіжного досвіду показує, що ефективними рішеннями є закриття прорізів у роздільних смугах, розділення потоків транспорту у просторі (наприклад, шляхом будівництва мостових розв'язок) або у часі (повне сигналізоване регулювання руху та фізичні бар'єри). Також важливим є контроль швидкості трамваїв у критичних зонах для зменшення кінетичної енергії при можливому зіткненні.

Таким чином, для покращення безпеки руху в Україні необхідне комплексне вивчення впливу трамвайного транспорту на ефективність функціонування елементів ВДМ, зокрема, аварійність і розробка ефективних заходів його інтеграції у транспортну систему міст. Вивчення світового досвіду та впровадження сучасних підходів дозволить не лише зменшити

кількість ДТП, але й підвищити ефективність функціонування громадського транспорту загалом.

Проблеми руху трамваїв у м. Львів є актуальними через складну дорожню мережу, високу інтенсивність руху та застарілу інфраструктуру. Однією з головних проблем є конфліктні ситуації між трамваями та автомобілями, особливо на перехрестях та в місцях розворотів через трамвайні колії. Часто водії не враховують особливості руху трамваїв, що призводить до аварійних ситуацій. Водночас у м. Львів вже реалізуються певні заходи для покращення дорожнього руху та підвищення безпеки трамвайного транспорту. Наприклад, модернізація трамвайних колій, впровадження світлофорного регулювання на проблемних ділянках та оновлення рухомого складу дозволяють зменшити кількість аварій та підвищити ефективність роботи трамваїв. Досвід міста може бути корисним для інших міст України, оскільки демонструє можливості інтеграції трамвайного транспорту в сучасну систему міського руху з урахуванням безпеки та комфорту пасажирів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. По-перше, слід згадати, що рух транспортних засобів (ТЗ) на ВДМ створюється траєкторіями, які перетинаються через потребу учасників дорожнього руху виконувати обгони, перестроювання, повороти та розвороти. За наявності трамвайної колії посередині проїжджої частини водії повинні дотримуватись вимог правил дорожнього руху (ПДР) щодо пропуску рейкових ТЗ [2].

Недотримання вищеперелічених вимог безпеки руху утворює загрозу виникнення певних транспортних конфліктів міського електричного транспорту (трамвая) з іншими учасниками під час руху перегонами, серед яких в роботах [3,4] виділено такі основні типи конфліктів: конфлікти під час руху (попутне зіткнення з ТЗ через раптове гальмування, поперечні зіткнення при спробах в'їзду на колію перед трамваєм, небезпека обгону трамвая та зіткнення із зустрічним рухом); конфлікти під час зміни напрямку руху трамвая; конфлікти в зонах зупинок (затримки через скупчення транспорту

на світлофорі, що перешкоджає безпечній посадці-висадці пасажирів, блокування посадкової зони іншими ТЗ, небезпека для пасажирів через невиконання водіями ПДР щодо зупинки біля трамвая); конфлікти на відокремлених трамвайних коліях (затримки через автобуси, що блокують рух трамвая, перехрещення посадкових зон трамвая та автобусів, що створює незручності для пасажирів). В роботах автором зазначається, що оптимальним рішенням для зменшення конфліктів є відокремлення трамвайних колій, вдосконалення світлофорного регулювання та впровадження інтелектуальних транспортних систем. Правила влаштування трамвайних колій передбачено в ДБН В.2.3-5:2018 та ДБН Б.2.2-12:2019.

Важливим при вивченні питань впливу громадського електротранспорту є його зупинки, які відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки дорожнього руху, ПС транспортної мережі та комфорту пасажирів. Їх розташування повинно враховувати баланс між зручністю пересадки та мінімізацією затримок у русі громадського транспорту, що є особливо важливим у вузлах інтенсивного транспортного та пішохідного руху, таких як перехрестя магістральних вулиць. Основними критеріями вибору місць для облаштування зупинок є: безпека пасажирів на всіх етапах пересування, включаючи посадку та висадку; мінімальний вплив на основні ТП з урахуванням конфліктних зон; зручний доступ до ключових об'єктів міської інфраструктури. Оптимальне розташування зупинок визначається на основі комплексного аналізу пішохідних потоків, маршрутів громадського транспорту та розташування об'єктів тяжіння пасажирів. Дослідження свідчать, що надмірно короткі інтервали між зупинками трамваїв (100–200 м) [5] спричиняють значні затримки руху, тому рекомендується їх об'єднання або збільшення відстані між ними. Для забезпечення пріоритетного руху громадського транспорту необхідно впроваджувати наступні заходи: дотримання ПДР та державних стандартів щодо ОДР; оптимізація світлофорного регулювання для мінімізації затримок; обмеження руху іншого транспорту на маршрутах МПТ; створення виділених смуг.

Збалансоване планування та розташування зупинок сприятиме підвищенню безпеки, ефективності та комфорту пересування пасажирів у міському середовищі. При цьому потрібно розуміти, що пріоритетний рух трамваїв можна забезпечити без світлофорного регулювання – керованими знаками та табло, а із світлофорним регулюванням – автоматичною активацією сигналів через детектори, що ідентифікують трамвай (для цього застосовують індуктивні контури, радарні та відеодетектори, транспондери) [3].

Отже, аналіз вітчизняної літератури дозволяє виділити ключові проблеми організації руху громадського електротранспорту, зокрема трамваїв, та визначити основні напрями для їх оптимізації. Водночас вітчизняний досвід має певні обмеження, пов'язані з технічними можливостями та рівнем розвитку транспортної інфраструктури.

Для отримання комплекснішого бачення та впровадження передових практик доцільним є звернення до закордонних джерел. Аналіз світового досвіду дозволить ознайомитися з інноваційними підходами до організації міського електротранспорту, методами мінімізації конфліктів у ТП і забезпечення пріоритетного руху трамваїв. Це сприятиме формуванню ефективних рішень, адаптованих до умов українських міст.

Дослідження найбільшої у світі компанії-оператора трамвайної системи Yarra Trams [6] показують, що ДТП між трамваями та автомобілями, особливо під час виконання розворотів через колії, хоч і не є частими, проте спричиняють значні травми та негативно впливають на ефективність роботи трамвайного транспорту. Основні причини таких ДТП включають: невірну оцінку безпечного інтервалу між автомобілем та трамваем; обмежену видимість трамваїв; водійську неуважність та порушення ПДР.

Щоб зменшити кількість таких ДТП, необхідно впроваджувати комплексні заходи, які поєднують: закриття прорізів у роздільних смугах або створення безпечних альтернативних маршрутів; розділення потоків транспорту у просторі або часі; зниження швидкості трамваїв та контрольовані розвороти. Важливо зазначити, що в контексті концепції

"Безпечна система" (Safe System) фокус має зміщуватися з покладання провини на створення умов, що мінімізують ймовірність серйозних травм.

Оскільки чим нижча швидкість підходу трамвая, тим коротший його гальмівний шлях і менша енергія удару, перегляд швидкісного режиму є одним із ключових інструментів підвищення безпеки. Матеріал даної статті може бути нам в нагоді для порівняння міжнародного та вітчизняного досвіду, а також формування обґрунтованих пропозицій щодо підвищення ефективності міського електротранспорту.

В більш свіжих дослідженнях Yarra Trams [7] для зменшення кількості ДТП випробувала систему V2V-комунікації (vehicle-to-vehicle), яка передбачає оповіщення водіїв про наближення трамваїв та пасажирів. Результати показали значні переваги для безпеки дорожнього руху та урбаністичного середовища. Як зазначено в статті у майбутньому планується масштабування системи з використанням штучного інтелекту та сенсорних технологій. Для нас ці дослідження можуть бути корисними в плані: підвищення безпеки, оскільки використання V2V та V2I-технологій для оповіщення водіїв про трамваї дозволить знизити кількість ДТП у містах; зменшення затримок через ДТП, що сприятиме підвищенню доступності наземного електротранспорту; запозичення прикладу розвитку транспортних інфраструктур та впровадження інтелектуальних систем у міському русі.

Надзвичайно цінним є для нас дослідження [8], в якому пропонується використання системи пріоритету сигналів для громадського транспорту (Transit Signal Priority, TSP) та колаборативної структури керування для оптимізації руху трамваїв та підключених ТЗ (Connected Vehicles, CV) на перехрестях. Використання генетичного алгоритму дозволяє налаштовувати тривалість фаз сигналів, зменшувати затримки, покращувати комфорт пасажирів, скорочувати час подорожі та знижувати енергоспоживання. У контексті нашого дослідження запропоновані системи дозволяють мінімізувати затримки для трамваїв на перехрестях та створювати більш передбачуваний графік руху, технології V2V забезпечують ефективну

координацію трамваїв та автомобілів, що може знизити конфлікти та підвищити ПС міських доріг, зменшення енергоспоживання та заторів сприяє сталому розвитку міської транспортної мережі, а оптимізація сигналів та маршруту позитивно впливає на комфорт пересування громадським транспортом. Ці підходи можуть бути адаптовані для українських міст, що стикаються з аналогічними проблемами щодо руху наземного електротранспорту та автомобілів на спільних ділянках доріг.

Дослідження [9] аналізує вплив управління трамваями на ПС руху та поведінку водіїв автомобілів на перехрестях. Методологія включає математичне моделювання та опитування водіїв. У роботі виділено три ключові етапи: визначення оптимальної кількості трамваїв для задоволення реального попиту; оцінка того, як надмірна кількість трамваїв блокує інші ТЗ та знижує ПС на перехрестях; вивчення думок автомобілістів щодо причин заторів і впливу цих факторів на їхню поведінку. У висновках авторами зазначено, що управління трамвайним рухом є неефективним через розрив між фактичною потребою у трамваях і реальною кількістю на маршрутах.

Велика кількість трамваїв на маршрутах спричиняє затори та ускладнює роботу світлофорів на перехрестях. Більше 75% водіїв постійно відчують стрес через ці проблеми, що погіршує їхню поведінку на дорогах. Для нас з цієї статті корисним може бути визначення раціональної кількості трамваїв для уникнення заторів; розробка рішень для покращення управління перехрестями, де рухаються трамваї; врахування психологічного аспекту дорожніх заторів при плануванні транспортної інфраструктури; запозичення ідей щодо удосконалення трамвайного менеджменту та зниження негативного впливу на дорожній рух у містах України.

В дослідженні [10] авторами запропонований новий підхід до оптимізації міського електротранспорту, здійснений аналіз його вплив на ТП та надана методика оцінки критичних ділянок трамвайної мережі. Стохастичний підхід до моделювання може бути застосований для аналізу ефективності дорожнього руху з урахуванням міського електротранспорту.

Стаття [11] пропонує мікроскопічну модель трамвайної системи, інтегровану з моделюванням дорожнього руху. Вона враховує взаємодію між сигналами трамваїв і світлофорами загального дорожнього руху. Модель складається з шести модулів: пасажирського, транспортного, обладнання трамвая, дорожнього руху, взаємодії та продуктивності. Для перевірки її достовірності проводиться порівняння реальних та змодельованих даних, включаючи час подорожі та середній час очікування пасажирів.

Результати досліджень в статті можуть допомогти оцінити, як міський електротранспорт впливає на загальну ефективність дорожнього руху, оскільки містять методику аналізу взаємодії трамвайних маршрутів і світлофорних циклів, що може бути корисним для оптимізації ТП у містах. Також запропонований підхід до координації сигналів дозволяє розробляти стратегії "зеленої хвилі" для трамваїв, що може підвищити швидкість та регулярність їхнього руху.

В роботі [12] запропонована мікромодель трамвайного руху, яка враховує унікальні параметри трамваїв (форму, місткість) для точного транспортного моделювання. Наявні моделі більше орієнтовані на перехрестя та автомобільні смуги, що ускладнює аналіз трамвайного руху. Запропонована модель поєднує теорію ПС автомобілів із підходами польських залізниць, що забезпечує сумісність із моделями вуличного та залізничного транспорту. Це також дозволяє застосовувати її для проміжних систем, таких як виділені смуги для автобусів або трамвайно-залізничні гібриди. Результати цього дослідження можуть бути корисними при розробці моделей трамвайного руху, які точніше відображають його особливості, а також для аналізу взаємодії трамваїв із загальним трафіком, оптимізації ПС та адаптації моделювання до специфіки конкретного міста.

Цікавою є робота [13], в якій представлені математичні моделі та результати дослідження перехрестя на багатосмуговій магістралі у великому місті Польщі. Автори виявили взаємозв'язок між швидкістю автомобілів і наявністю трамвайних колій, що важливо для визначення реальної ПС

міських перехресть. Також розглянуто вплив трамвайних колій на зміну швидкості автомобілів та рівень шуму. Отримані результати можуть бути використані для оновлення методів оцінки ПС перехресть у Польщі. Ця стаття може бути корисною при оцінці впливу трамвайних колій на швидкість руху автомобілів і ПС доріг. Вона також містить дані про шумове забруднення, що може бути корисним при аналізі екологічного впливу трамвайної інфраструктури.

Дослідження може бути застосоване при плануванні та організації руху на міських перехрестях.

Авторами роботи [14] аналізується безпека пасажирів під час посадки та висадки з трамваїв на зупинках, які відділені від колій проїжджою частиною. Це створює ризики для всіх пасажирів, особливо для людей з обмеженими можливостями.

Дослідження включає класифікацію трамвайних зупинок за кількістю смуг руху, які пасажирам доводиться переходити, а також огляд літератури та пілотне дослідження на трамвайній мережі Метрополії GZM у Польщі для виявлення конфліктних взаємодій між пасажирами та водіями. Стаття містить конкретні приклади таких ситуацій, методику аналізу ризиків на трамвайних зупинках та пропозиції щодо їх зниження, що може бути корисним для оцінки впливу трамвайного транспорту на безпеку дорожнього руху та взаємодію між пасажирами і автомобілістами.

Аналіз літератури демонструє, що за кордоном дослідження трамвайного руху давно вийшли за межі простої фіксації ДТП чи конфліктних ситуацій. Там активно впроваджують інтелектуальні системи управління трафіком, оптимізацію світлофорних фаз, пріоритет трамваїв, технології V2V та V2I, а також моделюють рух для підвищення безпеки й ефективності транспорту. В Україні ж ми поки що здебільшого лише збираємо статистику, але реальних системних змін майже не впроваджуємо.

Більше того, рішення часто приймаються в протилежному напрямку — замість розвитку міського електротранспорту відбувається демонтаж

трамвайних колій під приводом «підвищення ПС». Такий підхід не лише суперечить міжнародному досвіду, а й позбавляє міста екологічного, ефективного та прогнозованого виду транспорту.

Очевидно, що настав час переходити від пасивного аналізу проблем до активного застосування сучасних транспортних рішень.

Постановка завдання. У статті запропоновано дослідити вплив різних варіантів розміщення трамвайних колій на параметри руху ТП та рівень аварійності, поєднуючи ці зміни з сучасними методами ОДР. Метою є визначення оптимального сценарію, який дозволить підвищити ПС, мінімізувати конфлікти між видами транспорту та покращити безпеку на досліджуваній ділянці вулиці.

4.3 Приклад впровадження

Для дослідження нами обрана ділянка вул. Полтавський Шлях від вул. Петра Болбочана до вул. Озерянської в м. Харків загальною протяжністю 443 м (див. рис. 4.1).

Відповідно до Генерального плану міста Харкова вул. Полтавський Шлях є магістральною вулицею загальноміського значення регульованого руху. Вздовж магістралі пролягають трамвайні колії. На ділянці вул. Полтавський Шлях від вул.

Озерянській до вул. Болбочана трамвайні колії розташовані на проїзній частини, на перехресті вул. Полтавський Шлях - вул. Болбочана трамвайні колії переходять на відокремлене трамвайне полотно. На ділянці існує ряд транспортних проблем:

1. Висока потенційна небезпека зіткнення ТЗ пов'язана з тим, що ТЗ, що рухаються у бік центру при повороті ліворуч на вул. Озерянській на нерегульованому перехресті вимушені довго чекати розрив в щільному потоці автомобілів, які рухаються з центру в напрямку вул. Болбочана, і деякі автомобілісти порушують правила дорожнього руху і не пропускають зустрічний потік, чим створюють аварійну ситуацію (див. рис. 2, рис.3).



Рисунок 4.1 – Схема ділянки, що досліджується

2. В місці повороту на вул. Озерянську автомобілі займають смугу попутного руху на трамвайній колії, щоб здійснити поворот ліворуч. Дуже часто виникає ситуація, коли автомобілі займають смугу зустрічного руху на трамвайній колії, що перешкоджає руху трамваю, і трамвай змушений зупинитися. Але на цій ділянці існує ухил, який небезпечний для стоянки трамваю. І трамвай може відкотитися назад, що є дуже небезпечним (див. рис. 4.2).

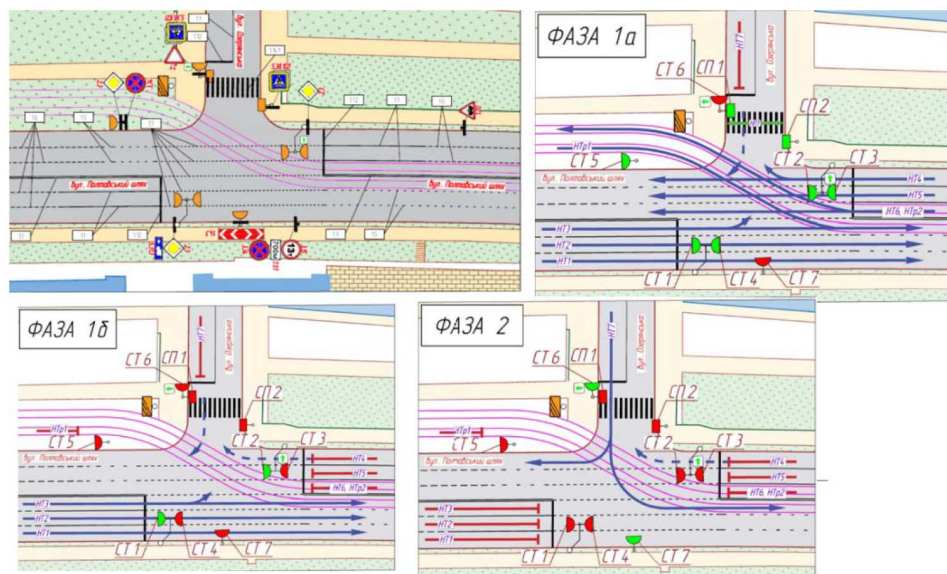


Рисунок 4.2 – Запропоновані схеми розташування технічних засобів регулювання руху та пофазного роз'їзду

2. Перенести трамвайні колії з проїзної частині до відокремленого полотна з перехрестя вул. Полтавський Шлях – вул. Болбочана на інше за двома варіантами: на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська (див. рис. 8) та на перехресті вул.

Полтавський Шлях – вул. Кандаурова (рис. 4.3).

3. Перенести трамвайну зупинку на відокремлене трамвайне полотно.

4. Налаштувати координований режим роботи між новим світлофорним об'єктом (вул. Полтавський шлях – вул. Озерянська) та двома існуючими (вул.

Полтавський шлях – вул. Кандаурова та вул. Полтавський шлях – вул. Болбочана) для режиму «Зеленої хвилі» (рис. 4.3).

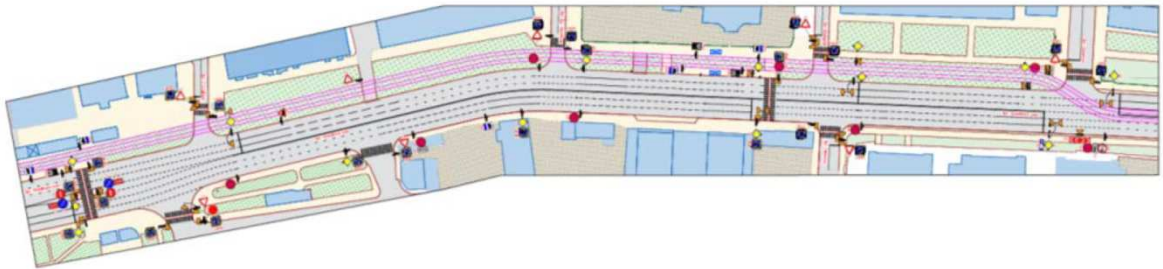


Рисунок 4.3 – Варіант перенесення трамвайних колій з проїзної частина на окреме трамвайне полотно на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська

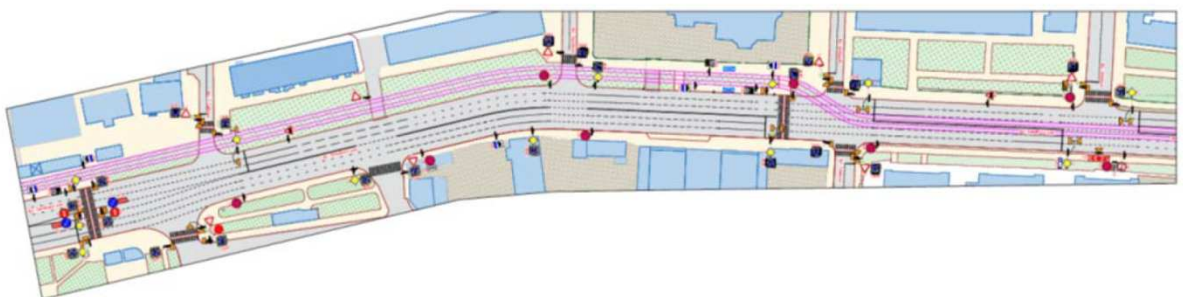


Рисунок 4.4 – Варіант перенесення трамвайних колій з проїзної частина на окреме трамвайне полотно на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Кандаурова

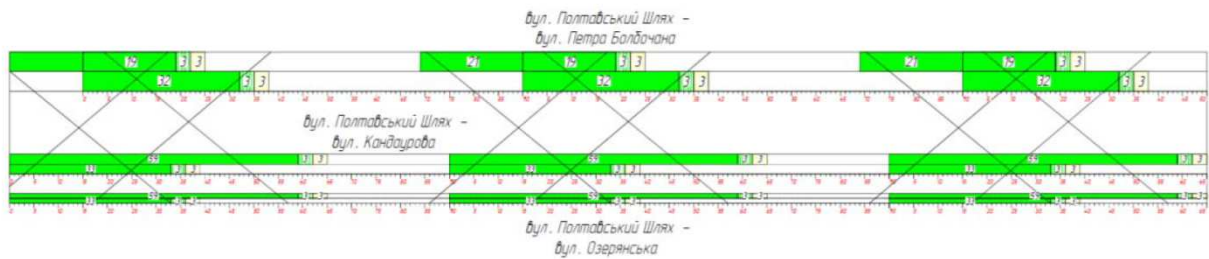


Рисунок 4.5 – Координація світлофорних об'єктів

Для оцінки запропонованих рішень виконано імітаційне моделювання руху на ділянці вул. Полтавський Шлях від вул. Петра Болбочана до вул. Озерянської в м.

Харків в програмному забезпеченні PTV Vissim при трьох варіантах – існуючому та двома запропонованими з перенесенням трамвайної колії (рис. 4.6). Отримані результати свідчать про позитивний вплив на безпеку руху від реалізації запропонованих варіантів. Перший варіант має більше зниження конфліктних точок, ніж другий. Очікувана загальна кількість зниження конфліктних точок в порівнянні з базовим варіантом (див. табл. 4.1). Стосовно інших показників, то аналіз

моделей показав суттєве поліпшення, для першого варіанту (див. табл. 4.2). За варіантом 1 час затримки зменшиться на 11%, кількість зупинок зменшиться на 1%, швидкість руху збільшиться на 6%. Для варіанту 2 год. затримки збільшився на 4%, кількість зупинок на 12% та швидкість руху зменшиться на 2%. Час поїздки за найбільш

завантаженим напрямком в центр по вул. Полтавський Шлях зменшиться на 2% при 1 варіанті і збільшиться на 2% при другому варіанті.

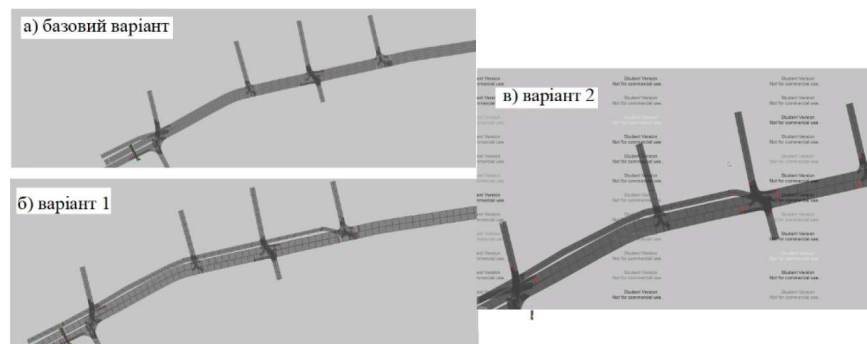


Рисунок 4.6 – Зображення варіантів моделювання

Таблиця 4.1 – Результати моделювання щодо безпеки руху

Тип конфлікту	Базовий варіант	Варіант 1	Варіант 2
перетинання	197	58	139
злиття	221	114	107
відхилення	57	31	26
загалом	475	203	272

Таблиця 4.2 – Результати моделювання

Показники	Базовий варіант	Варіант 1	Ефект в %	Варіант 2	Ефект в %
Середній час затримки ТЗ, с	55,95	50,41	11%	58,50	4%
Середня кількість зупинок ТЗ	1,70	1,68	1%	1,93	12%
Середня швидкість ТЗ, км/год	22,02	23,35	6%	21,52	2%
Час поїздки в бік центру, с	96,6	94,58	2%	98,75	2%
Час поїздки з центру, с	88,01	86,31	2%	96,13	8%

Як бачимо на теплових картах зміни швидкості руху (див. рис. 4.6), пропонований 1 варіант сприяє підтримці вищих та стабільніших швидкостей руху транспортного потоку на ділянках магістралі ніж варіант 2.

Результати моделювання показали, що перенесення трамвайної колії з проїзної частини на окреме трамвайне полотно у поєднанні зі світлофорним регулюванням на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська (варіант 1) в м. Харків значно покращує безпеку руху, зменшує транспортні затримки та сприяє стабільнішій швидкості руху. Порівняно з базовим сценарієм, цей варіант забезпечує суттєве зниження конфліктних точок, на 11% зменшує час затримки, підвищує швидкість руху на 6% та мінімізує кількість зупинок. Водночас варіант 2 (перенесення на перехресті вул.

Полтавський Шлях – вул. Кандаурова) виявився менш ефективним, оскільки призводить до збільшення затримок та зниження швидкості. Отже, вирішальним фактором стало саме оптимальне місце перенесення колій – якщо це зроблено завчасно, ТП мають більше простору для розділення, і конфліктні точки зменшуються.

ВИСНОВКИ

1. Згідно з виконаною маршрутизацією найбільш доцільно застосувати автомобілі КрАЗ, оскільки вони мають більшу продуктивність – 0,823 т-км/год.
2. Покілометровий виграш при цьому становить – 8,4 км. Покілометровий виграш при використанні менш продуктивного автомобіля – 8,4 км.
3. Аналіз відомих методик маршрутизації та складання розкладів транспортних засобів показав, що при зростанні кількості замовлень, особливо незапланованих, вони стають неефективними за якістю результатів.
4. Застосування попередньої класифікації є способом, який покращує результат. Відповідний алгоритм, який базується на впорядкуванні змішаних графів, використовує цілеспрямовані обмеження у вигляді орієнтованих зв'язків між замовленнями одного класу. Класифікація замовлень, власне, здійснена за ознаками часової сумісності з врахуванням часових вікон.
5. При застосуванні розробленої методики для динамічної маршрутизації і складання розкладів було виявлено, що вона дає суттєве покращення якості розкладу за показником простоювання. Але такий ефект досягається при великому горизонті планування і великих обсягах замовлень.
6. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації трамвайної інфраструктури в інших містах, що мають подібні проблеми з інтеграцією електротранспорту в загальний дорожній рух. Це може сприяти покращенню транспортної доступності, зниженню аварійності та підвищенню ефективності роботи громадського транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ключев С.О., Сігонін А.Є., Цимбал С.В. Розвиток інтелектуальних транспортних систем. *ВМТ*, 2023, вип. 18, вип. 2, с. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-18-2-80-86>
2. Правила дорожнього руху 2025: веб-сайт. URL: <https://vodiy.ua/pdr/> (дата звернення: 24.01.2025).
3. Ройко Ю.Я. (2017) Аналіз впливу трамваїв на безпеку руху. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. 2017, № 866. С. 225-229. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM_2017_866_41
4. Кульбашна Н. І. Зупиночний пункт як об'єкт дослідження роботи МЕТ в нових ринкових умовах *Сталий розвиток міст. Електричний транспорт – перспективи розвитку та кадрове забезпечення: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 1-3 жовтня 2009 р. Харків: ХНАМГ, 2009. С.107–109.*
5. Павлова І., Грабовець В., Дубицький О., Онищук В. Аналіз роботи маршрутного транспорту в зоні зупиночного пункту. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 2019, 2(13), 139-145. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.97>.
6. Nimmi Candappa, Bruce Corben and Jeremy Yuen. Addressing the Conflict Potential between Motor Vehicles and Trams at Cut-through Locations. *Monash University Accident Research Centre*. 2013. Report 317. 47 p.
7. Improving the future of road safety in Australia with Vehicle-to-Vehicle (V2V) communication Posted. Urban mobility, Passenger experience, Australia. 2022. URL: <https://innovation.keolis.com/en/projects-news- insights/improving-the-future-of-road-safety-in-australia-with-vehicle-to-vehicle-v2v-communication/>
8. Louati, A., Kariri, E. Enhancing Intersection Performance for Tram and Connected Vehicles through a Collaborative Optimization. *Sustainability*, 2023, 15(12), 9231. <https://doi.org/10.3390/su15129231>
9. Mouloud Khelf, Salim Boukebbab, Neila Bhouri. The Effect of Tram Management on Road Traffic Fluidity and its Influence on Drivers Behaviors at

- a Critical Junction in Algeria. *Transport Problems = Problemy Transportu*, 2023, 18 (2), pp.31-42. [ff10.20858/tp.2023.18.2.03ff](https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.2.03ff). [ffhal-04273335f](https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.2.03ff)
- 10.da Silva, L.D., Lollini, P., Mongelli, D. *et al.* A stochastic modeling approach for traffic analysis of a tramway system with virtual tags and local positioning. *J Braz Comput Soc* 27, 2, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13173-021-00105-x>
 - 11.Zhao X, Li Y, Xu S, Zhai H. Modeling a modern tram system integrated with a road traffic simulation. *SIMULATION*. 2018;94(1):77-90. doi:10.1177/0037549717734420
 12. Jeremi Rychlewski. Modelling of tram traffic quality. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*. 2004. URL: [www.researchgate.net/publication/290698427 Modelling of tram traffic quality](https://www.researchgate.net/publication/290698427_Modelling_of_tram_traffic_quality).
 - 12.Sobota A., Żochowska R., Szczepański E., and Gołda P., The influence of tram tracks on car vehicle speed and noise emission at four-approach intersections located on multilane arteries in cities. *Journal of Vibroengineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 2453–2468, Sep. 2018, <https://doi.org/10.21595/jve.2018.20087>
 - 13.Soczówka, P., & Żochowska, R. Interactions between tram passengers and road vehicles at tram stops - a pilot study. *Transactions on Transport Sciences*, 2020, 11(2), 64-76. doi: 10.5507/tots.2020.007
 - 14.Дротянко Л. Г. Феномен фундаментального і прикладного знання : (Постнекласичне дослідження) [Електрон. ресурс] / Л. Г. Дротянко. – Електрон. текст. дані. Київ : Вид-во Європ. ун-ту фінансів, інформ. систем менеджм. і бізнесу, 2000. 423 с. Режим доступу: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/10134>, вільний (дата звернення: 16.09.2022).
 - 15.Марцин В. С. Основи наукових досліджень : навч. посіб. / В. С. Марцин, Н. Г. Міценко, О. А. Даниленко. – Львів : Ромус-Поліграф, 2002. – 128 с.
 - 16.Перший трансатлантичний кабель [Електрон. ресурс] – Електрон. текст. дані. Режим доступу: <http://hi-news.pp.ua/tehnka-tehnologyi/10516-pershiy-transatlantichniy-kabel.html>, вільний (дата звернення: 16.09.2025).

- 17.Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 7-е изд., испр. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 512 с.
- 18.Rainer Weiss. Gravitational waves finally captured [Electronic resource] / Rainer Weiss, C Barry. Barish, S. Kip – Electronic text data. – // Thorne The Nobel Prize in Physics 2017.– Regime of access: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/press-40.pdf> , free (date of the application: 16.09.2022). – Header from the screen.
- 19.Великі перспективи слабого сигналу. Нобелівська премія з фізики 2017 р. // Вісник Національної академії наук України. 2017. № 12. С. 63 – 72.
- 20.Про особливості запровадження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2015 року № 266 [Електрон. ресурс] : наказ МОН від 06.11.2015 № 1151– Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <https://imzo.gov.ua/2015/11/06/nakaz-mon-vid-6-11-2015-1151-pro-osoblivosti-zaprovadzhennya-pereliku-galuzey-znan-i-spetsialnostey-za-yakimi-zdiysnyuyetsya-pidgotovka-zdobuvachiv-vishhoi-osviti-zatverdzhenogo-postanovoyu/>, вільний (дата звернення: 16.09.2022).
- 21.Хакен Г. Синергетика (Synergetics) / Г. Хакен. – М. : Мир, 1980. – 405 с.
- 22.Енциклопедія кібернетики : у 2 т. / за ред. В. М. Глушкова. – Київ : Гол. ред. Української радянської енциклопедії, 1973. – 570 с.
- 23.Bertalanffy L. von. General System Theory. Foundation, Development, Applications. / L. Bertalanffy. – Nev York : George Braziller, 1968. – 289 p.
- 24.Сорока К. О. Основи теорії систем і системного аналізу : навч. посіб. / К. О. Сорока. – Харків : ХНАМГ, 2004. – 291 с.
- 25.Геоінформаційний підхід до дослідження урбаністичних географічних систем (на прикладі м. Харків та області) / S. V. Kostrikov, L. M. Niemets, K. Y. Sehida та ін. // Вісник ХНУ ім. В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», (49), 2018. – С. 107–124.

26. Доля К. В. Геоінформаційні системи на транспорті : навч. посіб. / К. В. Доля, О. Є. Доля ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 230 с.
27. Вяткін К. І. Геоінформаційні технології для транспортної галузі міського будівництва / К. І. Вяткін, С. Г. Нестеренко, К. А. Мамонов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – Харків : ХНУМГ, 2017. – Вип. 6. – С. 56.
28. Golden B. L., Raghawan S., and Wasil E. A. *The Vehicle Routing Problem*, Springer, New York, 2008.
29. El-Sherbeny N.A. 2010. Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods N.A. *Journal of King Saud University*, vol. 22, 123–131. doi: 10.1016/j.jksus.2010.03.002.
30. Dorit S. 2006. Cyclical scheduling and multi-shift scheduling: Complexity and approximation algorithms. *Discrete Optimization*, 3 (4), 327–340. doi: 10.1016/j.disopt.2006.02.002
31. Hulianyskyi L., Sirenko S. 2010. Cooperative model-based metaheuristics. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 36, 33–40. Available from: <http://www.elsevier.com/copyright> doi:10.1016/j.endm.2010.05.005
32. Azi N., Gendreau M., and Potvin J.-Y. A dynamic vehicle routing problem with multiply delivery route. *Annals of Operations Research*, 2012 - Springer Azi, N., Gendreau, M. & Potvin, JY. *Ann Oper Res* (2012) 199: 103. <https://doi.org/10.1007/s10479-011-0991-3>
33. Vizvári B., Hashemian N. 2011. A method to schedule both transportation and production at the same time in a Special FMS. *RUTCOR Research Report RRR03-2011*.
34. Psaraftis H. N. Dynamic Vehicle Routing Problems. In: Golden B, Assad A (eds) *Vehicle Routing: Methods and Studies*, Elsevier Science Publishers B.V., 1988, P. 223–248.

35. Montemanni R. 2003. A New Algorithm for a Dynamic Vehicle Routing Problem Based on Ant Colony System. ... Workshop on Freight Available from: <http://people.idsia.ch/~luca/Montemanni%20et%20al..pdf>
36. Ritzinger U., Puchinger J., and Hartl Richard F. 2016. A survey on dynamic and stochastic vehicle routing problems. *International Journal of Production Research*, Taylor Francis, 54 (1), doi.10.1080/00207543. 2015.1043403. Available from: <https://hal.inria.fr/hal-01224562>
37. Larsen A., Madsen O. B. G. 2000. The dynamic vehicle routing problem. Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark (DTU). IMM-PHD, No. 2000-73
38. Karsten L., Madsen O. B. G., and Rygaard J. M. 1996. Vehicle Routing Problems with Varying Degrees of Dynamism. Technical report, IMM, The Department of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark.
39. Hanshar F., Ombuki-Berman B. 2007. Dynamic vehicle routing using genetic algorithms. *Appl Intell* 27: 89. <https://doi.org/10.1007/s10489-006-0033-z>.
40. Branke J., Middendorf M., Noeth G., Dessouky M. 2005. Waiting Strategies for Dynamic Vehicle Routing. *Transportation Science*, issue 3, 298–312. <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0095>.
41. Potvina J-Y., Xua Y., Benyahia I. 2009. Vehicle routing and scheduling with dynamic travel times *Computers & Operations Research* 33, 1129–1137. doi:10.1016/j.cor.2004.09.015.
42. Bahga A., Vijay K. Madiseti. 2013. Cloud-Based information technology framework for data driven intelligent transportation systems *journal of transportation technologies*, 3, 131-141 doi:10.4236/jtts.2013.32013
43. Flatberg T, Hasle G., Kloster O., Nilssen E.J., Riise A. 2007. Dynamic and stochastic vehicle routing in practice. In: Sharda R, Voß S, Zeimpekis V, Tarantilis CD, Giaglis GM, Minis I (eds) *Dynamic Fleet Management*, Operations Research/Computer Science Interfaces Series, vol 38, Springer US, 41–63.