Національний транспортний університет
Міністерство освіти і науки України

Національний транспортний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ОЛІСКЕВИЧ МИРОСЛАВ СТЕФАНОВИЧ

УДК 656.073 : 517.977.5

ДИСЕРТАЦІЯ

НАУКОВІ ОСНОВИ ОРГАНІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ПРОЦЕСІВ МАГІСТРАЛЬНОЇ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ

05.22.01 – транспортні системи

транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

М. С. Оліскевич

Науковий консультант –
Прокудін Георгій Семенович
доктор технічних наук,
професор

Ідентичність усіх примірників дисертації
Засвідчую
Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02

О. Ю. Усиченко

Київ-2020

АНОТАЦІЯ

Оліскевич М. С. Наукові основи організації транспортних процесів магістральної автомобільної доставки вантажів. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.01 – Транспортні системи. Національний транспортний університет, Київ, 2020.

У дисертаційній роботі вирішується актуальна науково-практична проблема надмірного резервування провізної здатності транспортних засобів під час доставки вантажів у магістральних транспортних мережах. Аналітичний огляд результатів існуючих теоретичних, практичних і експериментальних досліджень показав, такі особливості сучасної теорії організації транспортних процесів на магістральній мережі:

- структура ланцюгів постачання вантажів не відображена як сукупність взаємозалежних елементарних матеріальних, енергетичних та інформаційних перетворень, які взаємодіють; не досліджені закономірності квазі, або детермінованих циклів;

- якісні структурні зміни в транспортних процесах відбуваються в дискретні моменти часу, які залежать від динаміки, тому саме стосовно цих змін потрібно розглядати зародження необхідної інформації; в кожному з цих моментів існує об’єктивно необхідний обсяг інформації, який потрібно додатково дослідити;

- інформаційні потоки в транспортних системах можуть по-різному взаємодіяти; відсутні дослідження, які розкривають ефект підсилення/ послаблення інформаційних потоків;

- сучасні критерії керування не дають також змогу виявляти «вузькі місця» магістральної транспортної мережі й транспортних процесів, які відбуваються на цій мережі;

- найбільш ефективно функціонують комбіновані інформаційні системи, що поєднують бортові та зовнішні незалежні засоби для керування сукупністю автомобільних транспортних засобів на магістральних автомобільних дорогах, які недостатньо досліджені; відсутні концепції архітерктур таких систем керування;

- традиційні методи моделювання транспортних потоків (на макро- і мікро-рівнях) не дають змоги вирішити сучасні завдання, які стоять під час фу-

нкціонування організації транспортних процесів в інтелектуальних транспортних системах;

- в дослідженнях транспортних потоків вибір режимів, загалом, приймається раціональним з міркувань безпеки руху, зменшення простоїв та затримок; однак для певних дорожніх умов існує оптимальна програма розгону-руху-гальмування залежно від динамічних властивостей автотранспортних засобів, та довжини маршруту;

- відсутність теоретичного обґрунтування унеможливлює ефективне використання телеметричних засобів в організації транспортного процесу для вибору найбільш раціональних режимів руху в заданих умовах;

- найбільш ефективним є комбіноване управління рухом, яке використовує водночас централізовану автоматичну систему управління руху, засоби навігації й автономні бортові системи автомобілів.

Дисертаційна робота побудована на запропонованій автором *науковій ідеї*: основними причинами невідповідної до вантажопотоків кількості рухомого складу, зростання простоїв транспортних засобів по усіх категоріях, збільшення затримок доставки вантажів, зниження швидкості доставки, втрат і псування вантажів, а також перевантаження транспортних засобів понад дозволені норми і браку водіїв є те, що інформація в сучасних транспортних процесах, які зростають і розширюються, недовикористовується. У зв'язку з цим застосовується надмірне резервування провізної здатності парків АТЗ, часу на виконання кожного зокрема і сукупності взаємопов'язаних процесів, інтенсивності руху по магістралях, рівня завантаження автопоїздів, робочого часу водіїв та експедиторів. Сформульовано таку *робочу гіпотезу*. Необхідний рівень резервування ресурсів у транспортній системі для відповідної швидкодії та надійності доставки вантажів залежить від взаємодії суб'єктів транспортних процесів, яка забезпечується відповідною структурою системи керування. Великі ресурси систем керування перевезеннями закладені в циклічних транспортних процесах.

В дисертації розроблено методику досліджень і виконано оптимізацію циклічних транспортних процесів на магістральній транспортній мережі. Запропоновано «гнучкі» моделі транспортного процесу, в якому максимальні можливі сукупні затримки доставки вантажів від 2,2 до 5 разів перевищують мінімальні, в діапазоні інтенсивності сукупного вантажопотоку 5…15 транспортних пакетів/год. На заданій магістральній транспортній мережі існує де-

кілька оптимальних структур циклічного транспортного процесу. Кожна така структура може успішно виконуватись на обмеженому інтервалі інтенсивності потоку завдяки властивостям структурної пристосованості. Однак, для кожної структури характерним є єдине значення інтенсивності вантажопотоку, при якому транспортний процес реалізовується максимально ефективно.

Досліджено властивість адаптації транспортних процесів до зміни інтенсивності вхідного потоку. Запропоновано застосування відповідних структурних змін в транспортно-технологічних схемах, які узгоджують окремі логістичні операції. Для стабілізації виконання транспортного процесу з мінімальними втратами часу й коштів рекомендовано такі заходи, як частковий та повний перерозподіл потоків між напрямками і джерелами, а також зміну розмірів гуртів вантажів і видовження лінійних логістичних ланцюгів.

Транспортні процеси на магістральній мережі відображено у вигляді моделей елементарних логістичних операцій, які утворюють розгалужені логістичні ланцюги. Обґрунтовано детерміновані залежності організаційних параметрів операцій в логістичних ланцюгах. Вперше вдалося розв'язати задачу побудови гарантованого оптимального розкладу роботи задіяних в ланцюгах поставки автотранспортних засобів за критерієм мінімальних сумарних затримок процесу, при умові максимальної продуктивності парку автомобільних транспортних засобів на магістральній транспортній мережі.

Розроблена методологія побудови циклічних розкладів роботи групи транспортних засобів, на основі мультиагентного підходу, який дає гарантований розв'язок достатньої точності, за допустимий час для масивів даних, які періодично поновлюються. В результаті використання комп'ютерних програм, які базуються на даній методології, непродуктивні витрати часу роботи автопоїздів на міжміських маршрутах можна скоротити для сукупного парку автомобілів на 20…25% від загальної тривалості транспортних циклів. Тривалість доставки вантажів на міжміських внутрішніх маршрутах скорочується на 15…20%.

В результаті побудови оптимальної за енергоощадністю програми руху автомобіля по магістралі, при умові дотримання графіка руху, а також після верифікації моделі за низкою проведених експериментів встановлено, що цикл руху «розгін – вільне кочення» є більш ощадним, ніж рівномірний рух. Розроблено методику побудови низки типових транспортних циклів, які відрізняються середньою швидкістю, довжиною, структурою, але характеризу-

ються мінімальними витратами енергії руху без застосування ірраціональних режимів. Будь-який за складністю, планом траси та іншими мінливими умовами маршрут можна розглядати як сукупність елементарних циклів, які можна оптимально скомбінувати. У цьому випадку розроблені розклади роботи автотранспорту мають вищий якісний рівень. Розроблено методику імітаційного моделювання руху автомобільного транспортного засобу вздовж магістральної дороги міжміського сполучення, яка враховує усі прискорення / сповільнення, детально відображає достатньо велику дистанцію без залучення розподілених засобів. Усі маневри автотранспортних засобів здійснюються за принципом об'єктивної доцільності. Це відповідає концепції створення інтелектуальних транспортних систем на магістральній транспортній мережі.

Обґрунтовано спосіб, кількість джерел та моменти отримання повідомлень про дорожні транспортні та організаційні умови виконання транспортних завдань при здійсненні міжміських вантажних перевезень за принципом «не пізніше визначеного терміну», з дотриманням оптимальних режимів руху. Доведено, що використання декількох незалежних інформаційних потоків, з одного боку, зменшує відхилення від оптимальної програми руху, з іншого – скорочує час на прийняття ефективних рішень.

Практичне впровадження результатів дослідження дало змогу досягнути таких результатів: завдяки застосування методології керування парком транспортних засобів та відповідною комп'ютерної програми «Simulation-3» кількість відмов у виконанні замовлень скорочуються в цілому по автомобільних транспортних підприємствах на 28..35 % від загального потоку заявок. Тривалість виконання замовлень на міжміські перевезення вантажів на цих та інших підприємствах скорочується на 12…20 %. Покращено систему диспетчерського керування парком вантажівок, які здійснюють вантажні магістральні перевезення за допомогою розроблених рекомендацій та пакетів програм «Schedule-14»; що дало можливість вказати моменти відправлення і прибуття автомобілів з транспортних пунктів, враховуючи тривалість їх руху по магістральних дорогах, тривалість вимушеного простою, а також наявну інформацію про ймовірні замовлення на перевезення при наявності часових обмежень і ймовірних вимушених простоїв. В результаті використання комп'ютерної програми «Schedule-20» непродуктивні витрати часу автопоїздів на міжміських маршрутах скорочуються для сукупного парку вантажівок

автотранспортних підприємств, в середньому, на 20…25% від загального часу транспортних циклів. Тривалість доставки вантажів на відомих міжміських внутрішніх маршрутах, які обслуговують підприємства, скорочується на 15…20%. Усі подані результати підтверджено актами впровадження.

Ключові слова: транспортний процес, магістральна мережа, вантажні перевезення, транспортний цикл, матеріальні потоки, інформаційні потоки, спільний розклад операцій, мульти-агентний підхід.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Оліскевич М. Передумови створення інтелектуальних систем оперативного керування автотранспортом при доставці вантажів у міжміському сполученні. *Бізнес-моделі розвитку транспортних, агропромислових і інших підприємницьких структур: сучасні реалії та перспективи:* Колективна монографія з міжнародною участю / за ред. Л. М. Савчук, Л. М. Бандоріної. Дніпро: Пороги, 2018. 416 с. (параграф 4.5, С. 200-209).
2. Oliskevytch M. Modelling of complex highway automated control system as tool for reducing fuel consumption and emission in heavy-duty trucks. *Energetic and ecological aspects of agricultural production*. Chapter 5. Warsaw Un. of Life Sciences. Warsaw, 2010. P. 48-58.

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

3. Stotsko Z., Oliskevych M. Vehicle driving cycle optimisation on the highway. *Transport Problems*: an International Scientific Journal, 2016. Vol. 11 (2), Issue 2. P. 123-133. (*Scopus*) DOI: 10.20858/tp.2016.11.2.12
4. Oliskevych M. Optimization of periodic unitary online schedule of transport tasks of highway road trains. *Transport Problems*, 2018. Vol. 13 Issue 1. P. 111-122. (*Scopus*) DOI: 10.21307/tp. 2018.13.1.10
5. Prokudin G., Oliskevych M., Chupaylenko O., Dudnik O. Development of vehicle speed forecasting method for intelligent highway transport system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 2019. № 4/3 (100). P.6–14. (*Scopus*) DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174255

6. Sharai S., Oliskevych M., Roi M. Development of the procedure for simulation modeling of interrelated transport processes on the main road network. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5/3 (101). 2019. P.70-83. (*Scopus*) DOI: 10.15587/1729-4061.2019.179042
7. Oliskevych M., Kovalyshyn S., Magats M., Shevchuk V., Sukach O. The optimization of trucks fleet schedule in view of their interaction and restrictions of the european agreement of work of crews. *Transport Problems,* 2020. Vol. 15 Issue 2. P. 157-170. (*Scopus*) DOI: 10.21307/tp-2020-028
8. Oliskevych M., Pelo R., Prokudina I., Silenko V., Sorokivskyi O., Zaiats O. Optimization of vehicle speed forecasting horizont on the intercity highway. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. 3/3 (105). P.57-68. (*Scopus*) DOI: 10.15587/1729-4061.2020.204273

Статті у фахових виданнях:

9. Вільковський Є.К., Оліскевич М. С., Дорош В. М. Методика визначення необхідної кількості автотранспортних засобів на маятникових маршрутах. *Вісник НТУ*, 2006. №13. Ч.2. С.68–72.
10. Оліскевич М. С. Вплив завантаженості автопотяга на питомі витрати палива. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. №6 (112). Луганськ, 2007. С. 169–173.
11. Доля В. К., Оліскевич М. С. Оптимізація параметрів інформаційних потоків при виборі режимів руху автотранспортних засобів на вантажних магістральних перевезеннях. *Коммунальное хозяйство городов*. Серія: технічні науки та архітектура. Харків. Техніка, 2007. Вип. 79. С. 305–313.
12. Оліскевич М. С. Класифікація логістичних операцій в транспортно-технологічних схемах. *Вісник НТУ*. ч. 2. КНТУ, 2007. Вип. 15. С. 144-148.
13. Оліскевич М. С. Імітаційне моделювання вибору програми руху автотранспортних засобів на магістральних перевезеннях. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка*. Харків, 2008. Вип. 75. том 2. С. 122-130.
14. Оліскевич М. С. Залежність швидкості і прискорення автомобіля в транспортному магістральному потоці від характеристик інформаційного поля. *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту*, 2008. №2(6). С.132–137.

15. Оліскевич М. С. Концепція архітектури інформаційної системи магістральної транспортної мережі. *Вісник ЖДТУ*. Технічні науки, 2008. №3 (46). Том 2. С. 98–106.
16. Форнальчик Є. Ю., Оліскевич М. С. Концепція автоматизованої системи керування магістральними автотранспортними потоками. *Вісник НТУ*. Київ, 2009. №18. С. 60–69.
17. Оліскевич М. С. Оптимізація інтервалів дискретизації навігаційної інформації при дотриманні найбільш ощадних програм руху автомобілів в логістичних системах. *Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів і поїздів*. Київ, 2009. №17. С. 304–310.
18. Оліскевич М. С. Механізм ситуаційного керування автомобілем в магістральному транспортному циклі. *Вісник Східноукраїнського Національного університету* ім. В. Даля. Луганськ, 2010. №6(148). с. 89–93.
19. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Умови ефективного застосування магістральних програм імпульсного руху вантажних автомобілів. *Проектування, виробництво, експлуатація автотранспортних засобів та автопоїздів*. Львів. НКЦ НТУ, 2010. №18. С. 172–178.
20. Оліскевич М. С. Дискретно-подійне моделювання магістральних транспортно-технологічних систем автомобільного транспорту. *Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля.* Луганськ, 2011. №5(159). С. 242–248.
21. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Оптимізація логістичних витрат у транспортно-технологічній системі доставки продуктів харчування. *Вісник Львівського Національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження.* Львів. нац. агроуніверситет, 2011. № 15. С. 32-39.
22. Оліскевич М. С. Алгоритм інформаційного забезпечення вільного руху автомобіля на магістралі за енергоощадною програмою. *Вісник СевНТУ,* 2012. Вип. 135. С. 142-145.
23. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Імітаційне моделювання логістичних центрів в системі збуту продукції, яка швидко псується. *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля,* 2012. № 6 (177). Ч. 1. С. 98-103.

24.Оліскевич М. С. Оптимізація транспортних циклів залежно від обсягу прогнозованих вантажопотоків. *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля,* 2013. № 5 (194). Ч. 1. С. 140-145.

25.Оліскевич М. С. Обґрунтування періоду формування оптимальних планів перевезення вантажів на заданій транспортній мережі. *Вісник СевНТУ,* 2013. Вип. 142. С. 162-165.

26.Оліскевич М. С. Оптимізація структури автомобілепотоків для обслуговування заданого пункту відправлення вантажів. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2014. Вип № 45. С. 386-395.

27.Оліскевич М. С. Дослідження структури та параметрів транспортно-технологічної системи матеріального постачання за умов прогнозованої зміни попиту на продукцію. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, 2015. №1 (218). С. 226-229.

28.Оліскевич М. С. Стабілізація матеріальних потоків в транспортно-технологічних системах доставки вантажів. *Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля,* 2016. № 1 (225). С. 150-154.

29.Оліскевич М. С. Дослідження циклічних режимів роботи автомобіля на прямолінійній горизонтальній непересіченій ділянці дороги. *Міжвуз. збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2016. Вип № 55. С. 261-268.

30.Оліскевич М. С. Методика оцінювання стабільності транспортно-технологічних схем за умов змінних матеріальних потоків. *Вісник Житомирського держ. технологічного ун-ту*, 2016. №2(77). С. 193-200.

31.Прокудін Г. С., Оліскевич М. С. Методика оптимізації спільного розкладу парку магістральних автомобілів при наявності часових обмежень. *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*, 2018. №2 (82). С. 118-126. DOI: https://doi.org/10.26642/tn-2018-2(82)-118-126

32.Прокудін Г. С., Оліскевич М. С. Вплив структури транспортної системи на показники якості доставки вантажів у міжміському сполученні. *Вісник Національного транспортного університету*. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник, 2019. Випуск 1 (43). С. 143-158. DOI: 10.33744/2308-6645-2019-1-43-143-158

33.Прокудін Г. Шарай С., Оліскевич М., Рой М. Моделювання взаємодії автомобільних транспортних підприємств на міжміських перевезеннях ван-

тажів. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2019. 10 (2). С. 95-101. URL: 10.31649/2413-4503-2019-10-2-95-101.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

34. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Дискретне моделювання матеріальних потоків в логістичних схемах доставки вантажів, які швидко псуються. *Вісник НТУ,* 2006. №200. С. 72–78.

35. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Визначення необхідної кількості автотранспортних засобів в логістичній схемі збуту готової продукції. *Маркетинг та логістика в системі менеджменту*: тези доп. VI міжнар. наук.-практ. конф. (Львів. 9-10 лист. 2006) НУ „Львівська політехніка". Львів, 2006. С. 134.

36. Oliskevych M. Providing with optimal information amount the choice of hauling and speed modes of lorry on main transportations. *Problemy recyklingu*. Warszawa, 2007. P. 183-190.

37. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Визначення необхідної кількості автотранспортних засобів у логістичній схемі збуту готової продукції. *Вісник Нац. ун-ту "Львів. політехніка"*, 2007. № 580. С. 307-313.

38. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Залежність витрат енергії від динаміки виробничого процесу постачання замороженого м'яса. *Вісник Львівського Національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження*. Львів. нац. агроуніверситет, 2008. № 12. С. 64-75.

39. Oliskevycz M. Wpływ czynników organizacyjnych na toksyczność spalin emitowanych przez samochody ciężarowe w cyklu przewozowym w obrębie miasta. *Problemy recyklingu*. Warszawa, 2008. S. 83-87.

40. Оліскевич М., Козлинський М. Комплексна динамічна автоматизована система керування магістральними транспортними потоками. *Дев'ятий міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львов*і: тези доповідей. (Львів. 18-19 травня. 2009). Львів, 2009. С. 273-275.

41. Оліскевич М. С. Визначення параметрів розподілу бажаних швидкостей транспортних засобів у магістральному транспортному потоці: *65 наукова конференція науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету*: тези доп. (Київ. 14-18 травн. 2009) НТУ. Київ, 2009. С. 417-418.

42.Оліскевич М. С. Дослідження умов ефективності імпульсного руху магістральних автопоїздів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільної галузі*: тези доп. Всеукраїнська наук.-практ. конф. молодих учених та студентів. (Донецьк. 23-26 жовтн. 2011). Донецьк, 2011. С. 64.

43.Оліскевич М. С. Моделювання системи керування магістральними автомобілями як засобу рекуперації енергії за змінних дорожніх умов. *Десятий міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові*: тези доп. (Львів. 14-18 травн. 2011). Львів, 2011. С. 323-325.

44.Оліскевич М. С. Моделювання дискретних матеріалопотоків вантажних транспортних терміналів. *Проблеми підготовки професійних кадрів з логістики в умовах глобального конкурентного середовища*: матеріали 10-ї міжнар. наук.-практ. конф. (Київ. 18-19 жовтня 2012). Київ, 2012. С. 38-43.

45.Олискевич М. С., Дорош В. М. Оптимизация совместного расписания автомобилей и погрузчиков. *Современные фундаментальные исследования*. УЦ «МАГИСТР». Кисловодск, 2013. №4(11) С. 55-60.

46.Оліскевич М. С. Устаткування для дослідження циклічних режимів роботи силових агрегатів автомобіля. *Одинадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові*: тези доп. (Львів. 23-28 квітн. 2013). Львів, 2013. С. 121-122.

47.Оліскевич М. С. Дослідження умов ефективності імпульсного руху магістральних автопоїздів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільної галузі*: тези доп. II Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених та студ. (Донецьк. 14-18 лист. 2013). Донецьк, 2013. С. 103-105.

48.Оліскевич М. С. Оптимізація транспортно-технологічних систем регіональної магістральної транспортної мережі. *Проблеми підготовки професійних кадрів з логістики в умовах глобального конкурентного середовища*: матеріали 11-ї міжнар. наук.-практ. конф. (Київ. НАУ, 25-26 жовтня 2013). Київ, 2013. С. 44-48.

49. Оліскевич М.С. Методика оптимізації транспортних циклів. *Проблеми розвитку транспортних систем і логістики*: тези доп. IV Міжнар. науково-практичної конференції. (Євпаторія. 14-16 травня 2013). Євпаторія, 2013. С.89-90.

50. Оліскевич М. С. Моделювання та оптимізація інформаційних потоків в логістичному ланцюзі постачання. *Міські регіональні транспортні проблеми:* тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. (Харків. 17-19 листоп. 2015). Харків, 2015. С. 55.
51. Оліскевич М. С. Теоретичне обґрунтування структури транспортного циклу магістрального автопоїзда. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: тези доп. VIII міжнар. наук.-практ. конф. (Вінниця. ВНТУ. 19-21 жовтня 2015). Вінниця, 2015. С. 169-171.
52. Оліскевич М. С. Обґрунтування оснащення експериментального автомобіля-тягача при побудові емпіричної моделі оптимального керування. *Дванадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові*: тези доп. (Львів. 22-26 квітн. 2015). Львів, 2015. С. 139.
53. Оліскевич М. С. Оптимізація розкладу роботи міських автобусів із застосуванням дискретно-подійного моделювання. *Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конференції. (Львів. 24-25 вересня 2015). Львів, 2015. С. 78-79.
54. Оліскевич М. С. Моделювання інформаційних потоків у транспортно-технологічній системі постачання вантажів. *Логістичне управління та безпека руху на транспорті* : тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф. студ. та молодих вчених. (Харків. 18-20 лист. 2015). Харків, 2015. С. 88-90.
55. Oliskevych M. Optimization of information flows of logistic supply chain. *Econtechmod*. An Internat. Quarterly Journal, 2015. Vol. 4, No. 4. P. 71-76.
56. Оліскевич М. С. Стабілізація матеріальних потоків в транспортно-технологічних системах доставки вантажів. *Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи*: тези доп. міжнар. наук-практ. конф. (Трускавець. 11-17 квітня 2016). Сєвєродонецьк, 2016. С. 133-134.
57. Оліскевич М. С. Алгоритм оптимізації циклів міжміських вантажних перевезень. *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка», Динаміка, міцність та проектування машин і приладів,* 2017. № 866. С. 206-210.
58. Оліскевич М. Оптимізація транспортних циклів міжміських вантажних перевезень. *Проблеми з транспортними потоками і напрями їх*

розв'язання: тези доповідей. наук.-практ. конф. Нац. ун-т «Львівська політехніка». (Львів. 16-18 березня 2017). Львів, С. 12-13.

59. Oliskevych M. Optimization of load scheme of heavy vehicle for a given flow of goods. *Econtechmod. An Internat. quarterly journal,* 2017. Vol. 06. N. 1. P. 55-62.
60. Oliskevych M. Dynamic scheduling of highway cargo transportation ICCPT 2019 Proceedings of 1st International Scientific Conference «*Current Problems of Transport 2019*» May, 2019. Ternopil, Ukraine. P. 141-151.
61. Lebid I., Shevchenko D., Kravchenya I., Luzhanska N., Prokudin G., Oliskevych M. Rationing of the number of signals and interlockings in the operational stock of railway stations. *MATEC Web of Conferences*, 03036 (2019) EOT-2019. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/2019???03036

Свідоцтва та патенти:

62. Свідоцтво серія № 94207 "SCHEDULE-20" – програма побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі. Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М. Дата реєстрації 26.11.2019.
63. Свідоцтво серія № 94208. Комп'ютерна програма "Imitation16" – програма, яка виконує імітацію міжміських автомобільних перевезень вантажів при випадковому вхідному потоку замовлень. Прокудін Г. С., Оліскевич М. С., Шарай С. М., Рой М. П. Дата реєстрації 26.11.2019.
64. Свідоцтво серія № 94209 Комп'ютерна програма "Simulation 3"– програма імітаційного моделювання транспортного потоку на автостраді. Оліскевич М. С., Шарай С. М. Дата реєстрації 26.11.2019.
65. Свідоцтво серія № 94018. Науковий твір «Імітаційне моделювання транспортних процесів на магістральній мережі» Шарай С. М., Оліскевич М. С., Рой М. П. Дата реєстрації 19.11. 2019.
66. Свідоцтво серія № 89420. Науковий твір «Алгоритм комп'ютерної програми побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі» ("Schedule-14"). Прокудін Г. С., Оліскевич М.С., Чупайленко О. А. Дата реєстрації 05.06.2019.

SUMMARY

Oliskevich M. S. Scientific fundamentals of organization of transport processes of highway car carriage. Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.22.01 – Transport Systems. National University of Transport. Kyiv. 2020.

The dissertation deals with the actual scientific and practical problem of excessive reservation of carrying capacity of vehicles during delivery of cargoes in the main transport networks.

An analytical review of the results of existing theoretical, practical and experimental studies showed the following features of the modern theory of control of the highway transportation processes:

- the structure of cargo delivery chain is not shown as a combination of basic material, energy and information transformation, interacting; there are no regularities in quasi-theory or deterministic cycles;

- information flows in transport systems may interact differently; there are no studies that reveal the effect of strengthening / weakening information flows;

- the results of diagnosing the transport process are not fully used, so any modern large or medium-sized transport system is limited in control;

- the modern management criteria do not allow to identify "bottlenecks" of the backbone transport system;

- the most effective are information systems that combine on-board and external independent means to control a set of motor vehicles on highways, which are insufficiently studied; there are no concepts of architectures of such control systems;

- traditional modeling methods of traffic (on macro and micro levels) makes it difficult to deal with the current challenges in the functioning of transport system;

- a study of traffic mode choice generally accepted rational for reasons of safety, reducing downtime and delays; however for certain road conditions there is an optimal acceleration-movement-braking program depending on the dynamic properties of motor vehicles and the length of the route;

- the lack of theoretical substantiation makes it impossible to use telemetry facilities effectively in the organization of traffic for choosing the most rational in given transport conditions;

- the most effective is combined motion control, which uses both a centralized automatic motion control system and space navigation and autonomous onboard vehicle systems.

The dissertation is based on the proposed by the author *scientific idea*: the main reasons of the unequality of cargo flows, of the increase of vehicle downtime in all categories, of increasing delays in delivery of goods, of reducing the speed of delivery, and of losses and damages of freight, as well as overloading of transportation the drivers are information growing in today's and expanding transportation systems is underutilized. In this regard, there is an excessive reservation of such value as vehicles fleet capacity, the time for implementation of each in particular and the combination of interconnected processes, the intensity of traffic on the highways, the level of loading of trains, the working hours of drivers and freight forwarders.

Such a *working hypothesis* is formulated. The required level of reserve resources relevant transportation system performance and reliability of delivery of goods depends on the interaction of transport processes that ensured the appropriate structure of the control system. Large transportation resources management systems incorporated in the cyclical transport processes.

The research methodology is developed and the optimization of cyclic transport processes on the main transport networks in the dissertation is performed. The single “flexible” models of transport process are proposed which the maximum possible cumulative delays in the delivery of goods from 2.2 to 5 times exceed the minimum, in the intensity range of the cumulative cargo flow 5 ... 15 transport packages per hour. There are several optimal structures of a cyclic transport process on a given main transport network. Each of such a structure can be successfully implemented at a limited interval of flow intensity due to the structural adaptability properties. However, each structure is characterized by a single value of the intensity of cargo flow, in which the transport process is implemented as efficiently as possible.

The transport processes ability of adaptation to change the intensity of the input material flow are investigated. It is proposed to apply the appropriate structural changes in transport and technological schemes that coordinate individual logistical operations. To stabilize the transport process with minimal loss of time and money measures such as partial and complete redistribution of flows between

sources and destinations and resizing of groups of goods and elongation linear logistic chains recommended.

Transportation processes on the backbone network are reflected in the form of logistic operations models that form logistics chains. Determined dependencies of organizational parameters of operations in logistics chains are substantiated. For the first time, we managed to solve the problem of constructing a guaranteed optimum schedule of work of vehicles involved by the criterion of minimum total process delays, subject to the maximum performance of the vehicle fleet on the backbone transport network.

A multi-agent cyclic scheduling methodology that provides a guaranteed solution of sufficient accuracy within a reasonable time for periodically updated data sets developed for a group of vehicles. Unproductive running times for long-distance self-driving trains can be reduced by 20 ... 25% of the total length of transport cycles resulting from the use of computer programs based on this methodology for the total fleet of vehicles. The duration of delivery of goods on long-distance domestic routes is reduced by 15… 20%.

It is established that the cycle “acceleration - free rolling” is more saving than uniform movement, as a result of building the optimal program of energy movement of the vehicle on the highway, subject to the timetable, and after verification of the model by a number of experiments. A technique for constructing a series of typical transport cycles, which differ by average speed, length, structure, but which are characterized by minimal fuel consumption without the use of irrational modes, is developed. Any complexity, route plan and other changing conditions can be considered as a set of elementary cycles that can be optimally combined. In this case, the developed schedules have the highest quality level.

A simulation technique for simulating vehicle motion along a highway has been developed, which takes into account all acceleration / deceleration, and reflects in detail a sufficiently long highway distance without the use of distributed means. All motor vehicles maneuvers are carried out on the principle of objective expediency. This is in line with the concept of creating intelligent systems.

The method, the number of sources and the moments of reports receipt by road transport and on organizational conditions of performance of transport tasks during the performance of long-distance freight transportation on the principle of "not before a certain time", with observance of optimal modes of traffic are substantiated. On the one hand, the use of multiple independent information

streams reduces the deviation from the optimal motion program, on the other, it reduces the time for effective decisions.

The practical implementation of the results of the study made it possible to achieve the following results: thanks to the application of the vehicle fleet management methodology and the corresponding computer program “Simulation-3”, the number of refusals in the execution of orders is reduced overall by motor transport enterprises by 28..35% of the total flow. The duration of orders for long-distance freight transportation at these and other enterprises is reduced by 12…20%. Improved system of dispatching of the fleet of trucks, which perform freight haulage with the help of the developed recommendations and packages of programs “Schedule-14”; which made it possible to indicate the times of departure and arrival of vehicles from the transport points, taking into account the length of their traffic on the highways, the duration of the forced downtime, as well as the available information on possible orders for transportation in the presence of time constraints and probable downtime. The unproductive time spent on self-driving truck trains on long-distance routes is reduced for the aggregate truck fleet of these enterprises by an average of 20… 25% of the total time of transport cycles as a result of the use of the “Schedule-20” computer program. The duration of delivery of goods on the known long-distance inland routes serving the enterprises is reduced by 15… 20%. All submitted results are confirmed by the relevant implementing acts.

Keywords: transport process, backbone network, freight flows, transport cycle, material flows, information flows, joint operation schedule, multi-agent approach.

LIST OF PUBLISHED PAPERS ON THE DISSERTATION

Articles in editions of foreign countries or in editions of ukraine, which are included in international scientometric bases::

Monographs:

1. Оліскевич М. Передумови створення інтелектуальних систем оперативного керування автотранспортом при доставці вантажів у міжміському сполученні. *Бізнес-моделі розвитку транспортних, агропромислових і інших підприємницьких структур: сучасні реалії та перспективи:* Колективна монографія з міжнародною участю / за ред. Л. М. Савчук, Л. М. Бандоріної. Дніпро: Пороги, 2018. 416 с. (параграф 4.5, С. 200-209).

2. Oliskevytch M. Modelling of complex highway automated control system as tool for reducing fuel consumption and emission in heavy-duty trucks. *Energetic and ecological aspects of agricultural production*. Chapter 5. Warsaw Un. of Life Sciences. Warsaw, 2010. P. 48-58.

Articles in foreign publications or in Ukrainian publications that are included in international scientometric databases:

3. Stotsko Z., Oliskevych M. Vehicle driving cycle optimisation on the highway. *Transport Problems*: an International Scientific Journal, 2016. Vol. 11 (2), Issue 2. P. 123-133. (*Scopus*) DOI: 10.20858/tp.2016.11.2.12
4. Oliskevych M. Optimization of periodic unitary online schedule of transport tasks of highway road trains. *Transport Problems*, 2018. Vol. 13 Issue 1. P. 111-122. (*Scopus*) DOI: 10.21307/tp. 2018.13.1.10
5. Prokudin G., Oliskevych M., Chupaylenko O., Dudnik O. Development of vehicle speed forecasting method for intelligent highway transport system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 2019. № 4/3 (100). P.6–14. (*Scopus*) DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174255
6. Sharai S., Oliskevych M., Roi M. Development of the procedure for simulation modeling of interrelated transport processes on the main road network. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5/3 (101). 2019. P.70-83. (*Scopus*) DOI: 10.15587/1729-4061.2019.179042
7. Oliskevych M., Kovalyshyn S., Magats M., Shevchuk V., Sukach O. The optimization of trucks fleet schedule in view of their interaction and restrictions of the european agreement of work of crews. *Transport Problems,* 2020. Vol. 15 Issue 2. P. 157-170. (*Scopus*) DOI: 10.21307/tp-2020-028
8. Oliskevych M., Pelo R., Prokudina I., Silenko V., Sorokivskyi O., Zaiats O. Optimization of vehicle speed forecasting horizont on the intercity highway. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. 3/3 (105). P.57-68. (*Scopus*) DOI: 10.15587/1729-4061.2020.204273

Articles in professional publications:

9. Вільковський Є.К., Оліскевич М. С., Дорош В. М. Методика визначення необхідної кількості автотранспортних засобів на маятникових маршрутах. *Вісник НТУ*, 2006. №13. Ч.2. С.68–72.
10. Оліскевич М. С. Вплив завантаженості автопотяга на питомі витрати палива. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. №6 (112). Луганськ, 2007. С. 169–173.

11. Доля В. К., Оліскевич М. С. Оптимізація параметрів інформаційних потоків при виборі режимів руху автотранспортних засобів на вантажних магістральних перевезеннях. *Коммунальное хозяйство городов*. Серія: технічні науки та архітектура. Харків. Техніка, 2007. Вип. 79. С. 305–313.
12. Оліскевич М. С. Класифікація логістичних операцій в транспортно-технологічних схемах. *Вісник НТУ*. ч. 2. КНТУ, 2007. Вип. 15. С. 144-148.
13. Оліскевич М. С. Імітаційне моделювання вибору програми руху автотранспортних засобів на магістральних перевезеннях. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка*. Харків, 2008. Вип. 75. том 2. С. 122-130.
14. Оліскевич М. С. Залежність швидкості і прискорення автомобіля в транспортному магістральному потоці від характеристик інформаційного поля. *Вісті Автомоб.-дорожнього інституту*, 2008. №2(6). С.132–137.
15. Оліскевич М. С. Концепція архітектури інформаційної системи магістральної транспортної мережі. *Вісник ЖДТУ*. Технічні науки, 2008. №3 (46). Том 2. С. 98–106.
16. Форнальчик Є. Ю., Оліскевич М. С. Концепція автоматизованої системи керування магістральними автотранспортними потоками. *Вісник НТУ*. Київ, 2009. №18. С. 60–69.
17. Оліскевич М. С. Оптимізація інтервалів дискретизації навігаційної інформації при дотриманні найбільш ощадних програм руху автомобілів в логістичних системах. *Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів і поїздів*. Київ, 2009. №17. С. 304–310.
18. Оліскевич М. С. Механізм ситуаційного керування автомобілем в магістральному транспортному циклі. *Вісник Східноукраїнського Національного університету* ім. В. Даля. Луганськ, 2010. №6(148). с. 89–93.
19. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Умови ефективного застосування магістральних програм імпульсного руху вантажних автомобілів. *Проектування, виробництво, експлуатація автотранспортних засобів та автопоїздів*. Львів. НКЦ НТУ, 2010. №18. С. 172–178.
20. Оліскевич М. С. Дискретно-подійне моделювання магістральних транспортно-технологічних систем автомобільного транспорту. *Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля.* Луганськ, 2011. №5(159). С. 242–248.

21. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Оптимізація логістичних витрат у транспортно-технологічній системі доставки продуктів харчування. *Вісник Львівського Національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження.* Львів. нац. агроуніверситет, 2011. № 15. С. 32-39.
22. Оліскевич М. С. Алгоритм інформаційного забезпечення вільного руху автомобіля на магістралі за енергоощадною програмою. *Вісник СевНТУ,* 2012. Вип. 135. С. 142-145.
23. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Імітаційне моделювання логістичних центрів в системі збуту продукції, яка швидко псується. *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля,* 2012. № 6 (177). Ч. 1. С. 98-103.
24. Оліскевич М. С. Оптимізація транспортних циклів залежно від обсягу прогнозованих вантажопотоків. *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля,* 2013. № 5 (194). Ч. 1. С. 140-145.
25. Оліскевич М. С. Обґрунтування періоду формування оптимальних планів перевезення вантажів на заданій транспортній мережі. *Вісник СевНТУ,* 2013. Вип. 142. С. 162-165.
26. Оліскевич М. С. Оптимізація структури автомобілепотоків для обслуговування заданого пункту відправлення вантажів. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2014. Вип № 45. С. 386-395.
27. Оліскевич М. С. Дослідження структури та параметрів транспортно-технологічної системи матеріального постачання за умов прогнозованої зміни попиту на продукцію. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, 2015. №1 (218). С. 226-229.
28. Оліскевич М. С. Стабілізація матеріальних потоків в транспортно-технологічних системах доставки вантажів. *Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля,* 2016. № 1 (225). С. 150-154.
29. Оліскевич М. С. Дослідження циклічних режимів роботи автомобіля на прямолінійній горизонтальній непересіченій ділянці дороги. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2016. Вип № 55. С. 261-268.
30. Оліскевич М. С. Методика оцінювання стабільності транспортно-технологічних схем за умов змінних матеріальних потоків. *Вісник Житомирського держ. технологічного ун-ту*, 2016. №2(77). С. 193-200.
31. Прокудін Г. С., Оліскевич М. С. Методика оптимізації спільного розкладу парку магістральних автомобілів при наявності часових обмежень. *Вісник*

ЖДТУ. Технічні науки, 2018. №2 (82). С. 118-126. DOI: https://doi.org/10.26642/tn-2018-2(82)-118-126

32. Прокудін Г. С., Оліскевич М. С. Вплив структури транспортної системи на показники якості доставки вантажів у міжміському сполученні. *Вісник Національного транспортного університету*. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник, 2019. Випуск 1 (43). С. 143-158. DOI: 10.33744/2308-6645-2019-1-43-143-158
33. Прокудін Г. Шарай С., Оліскевич М., Рой М. Моделювання взаємодії автомобільних транспортних підприємств на міжміських перевезеннях вантажів. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2019. 10 (2). С. 95-101. URL: 10.31649/2413-4503-2019-10-2-95-101.

Published work approbation character:

34. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Дискретне моделювання матеріальних потоків в логістичних схемах доставки вантажів, які швидко псуються. *Вісник НТУ,* 2006. №200. С. 72–78.
35. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Визначення необхідної кількості автотранспортних засобів в логістичній схемі збуту готової продукції. *Маркетинг та логістика в системі менеджменту*: тези доп. VI міжнар. наук.-практ. конф. (Львів. 9-10 лист. 2006) НУ „Львівська політехніка". Львів, 2006. С. 134.
36. Oliskevych M. Providing with optimal information amount the choice of hauling and speed modes of lorry on main transportations. *Problemy recyklingu*. Warszawa, 2007. P. 183-190.
37. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Визначення необхідної кількості автотранспортних засобів у логістичній схемі збуту готової продукції. *Вісник Нац. ун-ту "Львів. політехніка". Логістика*, 2007. № 580. С. 307-313.
38. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Залежність витрат енергії від динаміки виробничого процесу постачання замороженого м'яса. *Вісник Львівського Національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження*. Львів. нац. агроуніверситет, 2008. № 12. С. 64-75.
39. Oliskevycz M. Wpływ czynników organizacyjnych na toksyczność spalin emitowanych przez samochody ciężarowe w cyklu przewozowym w obrębie miasta. *Problemy recyklingu*. Warszawa, 2008. S. 83-87.
40. Оліскевич М., Козлинський М. Комплексна динамічна автоматизована система керування магістральними транспортними потоками. *Дев'ятий мі-*

*жнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львов*і: тези доповідей. (Львів. 18-19 травня. 2009). Львів, 2009. С. 273-275.

41. Оліскевич М. С. Визначення параметрів розподілу бажаних швидкостей транспортних засобів у магістральному транспортному потоці: *65 наукова конференція науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету*: тези доп. (Київ. 14-18 травн. 2009) НТУ. Київ, 2009. С. 417-418.
42. Оліскевич М. С. Дослідження умов ефективності імпульсного руху магістральних автопоїздів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільної галузі*: тези доп. Всеукраїнська наук.-практ. конф. молодих учених та студентів. (Донецьк. 23-26 жовтн. 2011). Донецьк, 2011. С. 64.
43. Оліскевич М. С. Моделювання системи керування магістральними автомобілями як засобу рекуперації енергії за змінних дорожніх умов. *Десятий міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові*: тези доп. (Львів. 14-18 травн. 2011). Львів, 2011. С. 323-325.
44. Оліскевич М. С. Моделювання дискретних матеріалопотоків вантажних транспортних терміналів. *Проблеми підготовки професійних кадрів з логістики в умовах глобального конкурентного середовища*: матеріали 10-ї міжнар. наук.-практ. конф. (Київ. 18-19 жовтня 2012). Київ, 2012. С. 38-43.
45. Олискевич М. С., Дорош В. М. Оптимизация совместного расписания. *Современные фундаментальные и прикладные исследования*. УЦ «МАГИСТР». Кисловодск, 2013. №4(11) С. 55-60.
46. Оліскевич М. С. Устаткування для дослідження циклічних режимів роботи силових агрегатів автомобіля. *Одинадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові*: тези доп. (Львів. 23-28 квітн. 2013). Львів, 2013. С. 121-122.
47. Оліскевич М. С. Дослідження умов ефективності імпульсного руху магістральних автопоїздів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільної галузі*: тези доп. II Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених та студ. (Донецьк. 14-18 лист. 2013). Донецьк, 2013. С. 103-105.
48. Оліскевич М. С. Оптимізація транспортно-технологічних систем регіональної магістральної транспортної мережі. *Проблеми підготовки професійних кадрів з логістики в умовах глобального конкурентного середовища*: матеріали 11-ї міжнар. наук.-практ. конф. (Київ. НАУ, 25-26 жовтня 2013). Київ, 2013. С. 44-48.

49. Оліскевич М.С. Методика оптимізації транспортних циклів. *Проблеми розвитку транспортних систем і логістики*: тези доп. IV Міжнар. наук. – практ. конференції. (Євпаторія. 14-16 травня 2013). Євпаторія, 2013. С.89.
50. Оліскевич М. С. Моделювання та оптимізація інформаційних потоків в логістичному ланцюзі постачання. *Міські регіональні транспортні проблеми:* тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. (Харків. 17-19 листоп. 2015). Харків, 2015. С. 55.
51. Оліскевич М. С. Теоретичне обґрунтування структури транспортного циклу магістрального автопоїзда. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: тези доп. VIII міжнар. наук.-практ. конф. (Вінниця. ВНТУ. 19-21 жовтня 2015). Вінниця, 2015. С. 169-171.
52. Оліскевич М. С. Обґрунтування оснащення експериментального автомобіля-тягача при побудові емпіричної моделі оптимального керування. *Дванадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові*: тези доп. (Львів. 22-26 квітн. 2015). Львів, 2015. С. 139.
53. Оліскевич М. С. Оптимізація розкладу роботи міських автобусів із застосуванням дискретно-подійного моделювання. *Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конференції. (Львів. 24-25 вересня 2015). Львів, 2015. С. 78-79.
54. Оліскевич М. С. Моделювання інформаційних потоків у транспортно-технологічній системі постачання вантажів. *Логістичне управління та безпека руху на транспорті* : тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф. студ. та молодих вчених. (Харків. 18-20 лист. 2015). Харків, 2015. С. 88-90.
55. Oliskevych M. Optimization of information flows of logistic supply chain. *Econtechmod*. An Internat. Quarterly Journal, 2015. Vol. 4, No. 4. P. 71-76.
56. Оліскевич М. С. Стабілізація матеріальних потоків в транспортно-технологічних системах доставки вантажів. *Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи*: тези доп. міжнар. наук-практ. конф. (Трускавець. 11-17 квітня 2016). Сєвєродонецьк, 2016. С. 133-134.
57. Оліскевич М. С. Алгоритм оптимізації циклів міжміських вантажних перевезень. *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка», Динаміка, міцність та проектування машин і приладів,* 2017. № 866. С. 206-210.
58. Оліскевич М. Оптимізація транспортних циклів міжміських вантажних перевезень. *Проблеми з транспортними потоками і напрями їх*

розв'язання: тези доповідей. наук.-практ. конф. Нац. ун-т «Львівська політехніка». (Львів. 16-18 березня 2017). Львів, С. 12-13.

59. Oliskevych M. Optimization of load scheme of heavy vehicle for a given flow of goods. *Econtechmod. An Int. quart. journal,* 2017. Vol. 06. N. 1. P. 55-62.
60. Oliskevych M. Dynamic scheduling of highway cargo transportation ICCPT 2019 Proceedings of 1st International Scientific Conference «*Current Problems of Transport 2019*» May, 2019. Ternopil, Ukraine. P. 141-151.
61. Lebid I., Shevchenko D., Kravchenya I., Luzhanska N., Prokudin G., Oliskevych M. Rationing of the number of signals and interlockings in the operational stock of railway stations. *MATEC Web of Conferences*, 03036 (2019) EOT-2019. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/2019???03036

Certificates and patents:

62. Свідоцтво серія № 94207 "SCHEDULE-20" – програма побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі. Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М. Дата реєстрації 26.11.2019.
63. Свідоцтво серія № 94208. Комп'ютерна програма "Imitation16" – програма, яка виконує імітацію міжміських автомобільних перевезень вантажів при випадковому вхідному потоку замовлень. Прокудін Г. С., Оліскевич М. С., Шарай С. М., Рой М. П. Дата реєстрації 26.11.2019.
64. Свідоцтво серія № 94209 Комп'ютерна програма "Simulation 3"– програма імітаційного моделювання транспортного потоку на автостраді. Оліскевич М. С., Шарай С. М. Дата реєстрації 26.11.2019.
65. Свідоцтво серія № 94018. Науковий твір «Імітаційне моделювання транспортних процесів на магістральній мережі» Шарай С. М., Оліскевич М. С., Рой М. П. Дата реєстрації 19.11. 2019.
66. Свідоцтво серія № 89420. Науковий твір «Алгоритм комп'ютерної програми побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі» ("Schedule-14"). Прокудін Г. С., Оліскевич М.С., Чупайленко О. А. Дата реєстрації 05.06.2019.

ЗМІСТ

ВСТУП 30
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОРГАНІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ПРОЦЕСІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ 41
1.1 Сучасні проблеми міжміських та міжнародних автомобільних перевезень вантажів 41
1.2 Розвиток системного підходу до організації процесів магістральних перевезень 58
1.3 Аналіз моделей і методів дослідження 79
1.4 Обґрунтування критеріїв організації та розвитку процесів магістральних вантажних перевезень 87
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЦИКЛІВ 97
2.1 Закономірності вхідних матеріальних потоків на магістральній транспортній мережі 97
2.2 Дискретні детерміновані моделі логістичних ланцюгів 106
2.3 Класифікація циклічних транспортних процесів 117
2.4. Залежність показників ефективності ТП від інтенсивності матеріальних потоків 129
2.5. Висновки за розділом 2 138
РОЗДІЛ 3 УЗГОДЖЕННЯ МАТЕРІАЛЬНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У МАГІСТРАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ 140
3.1 Динаміка вантажопотоків і джерела інформаційних повідомлень в циклічних транспортних процесах 140
3.2 Аналіз та впорядкування інформаційних потоків 144
3.3 Методика оцінювання стабільності транспортних процесів за умов змінних матеріальних потоків 150
3.4 Стабілізація матеріальних потоків на магістральній транспортній мережі 156
3.5 Висновки за розділом 3 163

РОЗДІЛ 4 МЕТОДОЛОГІЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ОПТИМАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕСУ 164
4.1 Загальна характеристика задач організації транспортних процесів 164
4.2 Побудова оптимального розкладу сукупності АТЗ 168
4.3 Оптимізація циклічних планів перевезення збірних вантажів 178
4.4 Оптимізація циклічних планів перевезення унітарних вантажів із заданими часовими вікнами 188
4.5 Побудова циклічного розкладу взаємопов'язаних АТЗ з мінімальними сукупними затримками процесу..... 198
4.6 Динамічна маршрутизація з врахуванням наявних інформаційних потоків на мережі..... 203
4.7 Оптимізація режимів роботи та відпочинку водіїв групи АТЗ з врахуванням їх взаємодії..... 215
4.8 Висновки за розділом 4 229
РОЗДІЛ 5 ОРГАНІЗАЦІЯ ТА КОНТРОЛЬ РОЗПОДІЛУ МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ У ТРАНСПОРТНИХ ВУЗЛАХ..... 231
5.1 Характеристика транспортно-технологічних схем вантажопереробки у транспортних вузлах..... 231
5.2 Оптимізація автомобілепотоків для обслуговування заданого пункту відправлення вантажів..... 239
5.3 Узгодження вантажопотоків й автомобілепотоків у транспортному пункті магістральної транспортної мережі 251
5.4 Закономірності централізованого розподілу потоків в МТМ..... 256
5.5 Висновки за розділом 5 260
РОЗДІЛ 6 ОРГАНІЗАЦІЯ РУХУ АВТОПОЇЗДІВ НА МАГІСТРАЛЬНИХ ДОРОГАХ ЗА ЗАДАНОЮ ПРОГРАМОЮ..... 262
6.1 Модель системи керування рухом автопоїздів у магістральному потоці 262
6.2 Імітаційне моделювання руху автотранспортних засобів на магістральних дорогах..... 272

6.3 Аналіз потоку даних та якості керування рухом АТЗ на магістралі 282
6.4 Забезпечення оптимальною кількістю інформації магістральних АТЗ у транспортному потоці для вибору швидкості руху 294
6.5 Висновки за розділом 6 304
ВИСНОВКИ 307
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 311
ДОДАТКИ 351
Додаток А. Імітаційне моделювання виконання замовлень 352
Лістинг програми імітаційного моделювання на мові Делфі 7 353
Додаток Б. Нелінійне програмування в пакеті Solver електронних таблиць Excel 364
Додаток В. Лістинг програми Делфі побудови розкладів 369
Додаток Г. Початкові дані і програма цілочисельного програмування транспортних циклів в електронних таблицях Excel 383
Додаток Д. Лістинг програми Делфі імітаційного моделювання руху автомобіля-спостерігача вздовж магістралі 387
Додаток Е Початкові дані для імітаційного моделювання транспортного потоку на магістралі 393
Додаток Є Результати імітаційного моделювання магістрального руху ... 394
Додаток Ж Моделювання та оптимізація програми руху автомобіля при заданих дорожніх умовах 398
Додаток З Лістинг програми імітаційного моделювання руху АТЗ вздовж магістралі 400
Додаток К Залежності показників якості контролю швидкістю АТЗ на магістралі при різних наборах вхідних даних 406
Додаток Л Осцилограми, записані приладом Сканматік 418
Додаток Н Акти впровадження дисертаційних досліджень 422
Додаток П Свідоцтва авторських прав на твір 449
Додаток М Список публікацій здобувача 454

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АТП – автотранспортне підприємство

АТЗ – автотранспортний засіб

АС – автомобіль-спостерігач

ВМ – вантажне місце

ІМ – імітаційне моделювання

ІТС – інтелектуальні транспортні ситеми

ЕЛО – елементарна логістична операція

ЗК – задача коммівояжера

ЛЛ – логістичний ланцюг

ЛП – лінійне програмування

МП – матеріальний потік

МЕ – матеріальний елемент

МТМ – магістральна транспортна мережа

НРП – навантажувально-розвантажувальний пункт

НРМ – навантажувально-розвантажувальна машина

СМО – система масового обслуговування

ТП – транспортний процес

ТС – транспортна система

ТТС – транспортно-технологічна схема

ТЛК – транспортно-логістичний комплекс

AVL – automatic vehicle location (автоматичне позиціонування транспортного засобу)

DVPR – Dynamic Vehile Route Problem (динамічна задача маршрутизації транспортного засобу)

E-LLM – Evolution Learning Mashine (еволюційна модель машинного навчання, з допомогою якої досліджуються вхідні дані та створюються алгоритми, які можуть навчатися й робити передбачення з вхідних даних)

GPS – Global Positioning System (система глобального позиціонування)

SRR – Automotive Short Range Radar (портативний радар ближньої дії)

SWTS – Slide Windows Time Samples (Метод спостереження «ковзаючим вікном»)

Транспортний цикл – виробничий процес з перевезення вантажу, коли виконуються етапи подачі рухомого транспортного зособу під навантаження, транспортування і розвантаження.

Інтелектуальна транспортна система – транспортна система, що використовує сучасні телематичні технології контролю, призначена для автоматизованого пошуку та прийняття найбільш ефективних сценаріїв керування транспортним зособом з метою забезпечення мобільності при встановленому рівні якості послуг, що надає кінцевим споживачам більшу інформативність і безпеку, а також якісно підвищує рівень взаємодії учасників руху в порівнянні зі звичайними транспортними системами.

Магістральна транспортна мережа – це множина усіх шляхів сполучення та інших комунікацій, які зв’язують населені пункти заданого регіону.

NP-складність завдання – клас складності, до якого належать задачі, які можна розв'язати недетермінованими алгоритмами за поліноміальний час відносно довжини вхідного набору даних, в яких завжди існує шлях успішного обчислення.

Бажана швидкість транспортного засобу – швидкість, з якою транспортний засіб долає маршрут за час, що відповідає наперед запланованому розкладу виконання перевезень.

Такт – період повторення однієї, або групи операцій процесу.

ВСТУП

Актуальність теми. Збільшення товарообігу супроводжується зростанням обсягу перевезень вантажів. В довгостроковому періоді, динаміка вантажообігу у міжміському і міжнародному сполученні зростає і є тісно пов'язана зі станом ринків товарів та з економічною та соціально-політичною ситуацією в Європі в цілому, та в Україні, зокрема. В Україні після 2014 року також намітилась тенденція до зростання обсягів міжміських перевезень вантажів. Якщо розглядати структуру замовлень на перевезення, то за кількістю переважають замовлення, які не досягають розміру раціонального завантаження сучасних автопоїздів (20-25 тон). Далі за чисельністю йдуть дрібніші відправки (15-20 тон). Масові, великогуртові відправки займають лише третє місце серед вантажних міжміських перевезень.

Загальна чисельність вантажних автомобілів в Європі також зростає. В Україні чисельність вантажних автопоїздів зростає не так стрімко, як це відбувалось до 2014 року, однак щорічний приріст у 4-6% зберігається. Швидше зростає чисельність автомобільних транспортних підприємств (АТП), внаслідок чого підвищується рівень конкуренції на ринку транспортних послуг. Також потрібно відмітити тенденцію до оновлення рухомого складу. Таким чином, українські автомобільні перевізники могли б стати конкурентноздатними і задовольняти попит на вантажні перевезення, який зростає. Однак, при усіх описаних явищах спостерігаються і негативні ефекти, зміст яких полягає у затримках вантажопотоків, простоюванні транспорту та інших непродуктивних витратах часу в процесі доставки вантажів. Аналіз витрат часу на міжміські і міжнародні перевезення вантажів показав, що у структурі транспортного циклу тривалість пробігу автотранспортного засобу (АТЗ) з вантажем досягає лише 23…25%. Найбільші простої транспорту (до 32,5%) пов'язані з необхідним законодавчим відпочинком водіїв, навантажувально-розвантажувальними роботами і очікуванням їх початку (19,5%), а також приблизно 15% тривалості циклу витрачається на непередбачені простої у чергах на митницях, до вантажних терміналів, в очікуванні транспортного

завдання. У зв'язку з добовою та сезонною нерівномірністю вантажопотоків непродуктивні витрати часу парків АТЗ ще більше зростають. А також спостерігається збільшення цих витрат від 2014 року дотепер. З'ясовано, що серед основних причин, які приводять до зростання непродуктивних витрат часу АТЗ і затримок в доставці вантажів у міжміському сполученні є відсутність достатнього зв'язку перевізника з вантажовідправником і вантажоотримувачем; відсутність достатньої інформації й прогнозів умов перевезень; не виконуються оптимальні співвідношення між тривалістю окремих логістичних операцій; інформація необхідна для вироблення рішень є доступною, однак вона нераціонально розподілена на магістральній транспортній мережі (МТМ), не подається вчасно в необхідні місця, тому використовується неефективно. У Європейському транспортному просторі загальновизнаною вважається проблема перевантаження транспортних сполучень, особливо автомобільних міжміських доріг, а також нерівномірність розвитку транспортної інфраструктури.

Такі аспекти розкривають *зміст наукової проблеми*, яка існує і є актуальною на сьогоднішній день: контроль та керування транспортними процесами на МТМ здійснюється на основі неповної інформації, у зв'язку з чим застосовується надлишкове резервування таких факторів, як:

- провізної здатності парків АТЗ, що проявляється у низьких значеннях коефіцієнтів випуску;
- фондів часу циклів перевезення;
- інтенсивності руху АТЗ на магістралях.

Як наслідок, спостерігаються також затримки у доставці вантажів, відмови у виконанні перевезень, перевитрати енергоресурсів.

Зв'язок роботи з науковими програми, планами, темами.

Робота виконана згідно з Транспортною стратегією України на період до 2030 року. Дисертація відповідає Концепції розвитку конкурентоспроможної та екологічно сталої транспортної системи Єдиного європейського транспортного простору, яка розкрита в Білій книзі Європейської Комісії. Основні до-

слідження теоретичного та прикладного характеру виконані згідно з тематикою науково-дослідних робіт, що виконувалися Національним університетом «Львівська політехніка» та Національним транспортним університетом, а саме:

- держбюджетною науковою темою кафедри експлуатації та ремонту автомобільної техніки Національного університету «Львівська політехніка» №0107U009529, зокрема її розділу «Оптимізація транспортно-технологічних схем організації магістральних перевезень» (завершено 2013 р.);
- держбюджетною науковою темою кафедри експлуатації та ремонту автомобільної техніки Національного університету «Львівська політехніка» «Дослідження і оптимізація експлуатаційних властивостей автомобілів, технічного обслуговування та транспортних процесів» (2014 – 2018 рр.);
- держбюджетною науковою темою кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету №0112U008415 «Підвищення ефективності функціонування інтегрованих транспортних систем у міжнародному сполученні»;
- держбюджетною науковою темою «Моделювання економічної поведінки та стратегії розвитку суб'єктів господарювання» № 0116U008360 та ініційованої теми «Методологія соціальноекономічного, інформаційного та науково-технічного розвитку регіонів, галузей виробництва, підприємств та їх об'єднань» № 0116U006782;
- науково-дослідною темою «Оптимальні транспортно-технологічні схеми доставки вантажів на підприємстві з використанням засобів оперативного керування транспортними процесами» укладеної на умові госпдоговору з підприємством ТзОВ «Транс-Сервіс-1» Львівської області.

Мета дисертаційної роботи – створення наукових основ організації транспортних процесів на дорожній магістральній мережі для мінімізації часових затримок доставки вантажів і зменшення резервування провізної здатності парків транспортних засобів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати стан та тенденції розвитку міжміських та міжнародних автомобільних перевезень вантажів;
- систематизувати знання про структуру й властивості транспортно-транспортно-технологічних схем доставки вантажів, та про закономірності формування і взаємодії матеріальних та інформаційних потоків на МТМ;
- побудувати структурні моделі й дослідити закономірності адаптації транспортних процесів до зовнішніх збурень за наявного інформаційного забезпечення;
- розробити теоретичні моделі й методи побудови оптимальних розкладів виконання процесу доставки вантажів на МТМ паралельними автомобілепотоками, за критерієм мінімальних сумарних часових затримок;
- розробити методологію прийняття оптимальних рішень транспортними аґентами на МТМ щодо виконання квазіперіодичних замовлень з доставки вантажів;
- обґрунтувати концепцію оптимальної організації руху АТЗ по магістральних маршрутах на основі прогнозування та контролю швидкості АТЗ;
- розробити практичні методи організації роботи парку АТЗ на МТМ; оцінити техніко-економічний ефект від використання цих методів на автотранспортних підприємствах.

Об’єкт дослідження. Транспортні й логістичні процеси, матеріальні та інформаційні потоки на магістральних транспортних мережах.

Предмет дослідження. Взаємозв’язок матеріальних та інформаційних потоків на магістральній транспортній мережі, та його вплив на тривалість і затримки доставки вантажів.

Методи дослідження. Для досягнення сформульованої мети використано такі методи: системного аналізу, теорії інформації і кодування, теорії графів, теорії розкладів – для побудови структурних моделей ТП, імітаційного моделювання, зокрема методів дискретно-подійного та, мультиаґентного моделювання – для дослідження вхідних потоків замовлень на вантажні переве-

зення і ТП на МТМ; математичного програмування, кінцеві різницеві рівняння – для синтезу системи контролю.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в розробці науково-практичного підходу до організації та контролю транспортно-логістичних процесів міжміських вантажних перевезень з врахуванням їх інформаційного забезпечення, що дало змогу вирішити важливу науково-практичну проблему надмірного резервування провізної здатності парків АТЗ. Елементами наукової новизни є те, що:

вперше

- сформульовано і розв'язано задачу оптимізації вантажопотоків на МТМ як багатоекстремальну задачу нелінійного програмування із застосуванням попередньої класифікації змінних, формулювання та розв'язок якої досі був невідомий;
- встановлено аналітичні залежності параметрів вхідних й вихідних ланок логістичних ланцюгів доставки поштучних вантажів у міжміському сполученні, що дало можливість здійснити синтез оптимальних транспортних процесів з елементарних логістичних операцій (ЕЛО);
- виявлено квазіперіодичний характер процесів обслуговування стохастичних вхідних потоків замовлень на доставку вантажів, який дає змогу ефективніше використовувати відомі методи прогнозування вантажопотоків та отримувати гарантовані розв'язки розподільчих задач на МТМ;
- досліджено закономірності утворення статичних і динамічних часових затримок доставки вантажів, що дає змогу адаптувати структуру транспортно-технологічної схеми (ТТС) до зміни інтенсивності вхідного матеріального потоку (МП);
- визначено закономірності формування інформаційних потоків, які надходять до екіпажів вантажних АТЗ, про власні координати й швидкість, дорожні, транспортні й організаційні умови, що підвищує якість прийнятих рішень й знижує відхилення від оптимальної програми руху АТЗ;

- досліджено вплив інтервалів дискретизації сигналів від систем позиціонування АТЗ, та відповідного обсягу інформації, яка міститься у них, на вибір швидкості вантажних АТЗ, що дає змогу точніше дотримуватись розкладу виконання сукупності транспортних процесів на МТМ;

удосконалені та набули подальшого розвитку:

- метод структурного моделювання процесу доставки вантажів сукупністю АТЗ, що дає можливість отримувати гарантовані оптимальні розв'язки розподільчих задач на МТМ;
- метод розроблення однозначного, оптимального за швидкодією розкладу їздок на МТМ, для наперед заданої кількості АТЗ, що дає змогу більш точно оцінювати час виконання заданих замовлень;
- методика імітаційного моделювання автомобільного потоку на міжміській дорозі з використанням інтелектуальної транспортної системи (ІТС) 4-го покоління, що забезпечує можливість керування рухом АТЗ з мінімальними затримками і відхиленням від оптимальної програми;
- методика імітаційного мультиаґентного моделювання процесу виконання прогнозованого потоку замовлень на вантажні міжміські перевезення, яка дає змогу будувати сценарії можливих варіантів ТП, та обрати доцільну стратегію їх обслуговування;
- метод оптимізації розміщення вантажних одиниць в п'ятивісному автопоїзді при умові змінних кількості та розмірів доступних транспортних пакетів, що дало змогу підвищити точність розрахунку, врахувавши інтенсивність вхідних і вихідних вантажопотоків, фронт завантаження, розміри гуртів вантажів у пакетах і відправки.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків, рекомендацій підтверджено:

- методологією дослідження, що ґрунтується на апробованій теорії систем і теорії автоматичного керування, а також широкому застосуванні імітаційного моделювання та достатньо великого масиву експериментальних вхідних даних;

- аналізом великої кількості вхідних факторів і множинністю проведених експериментів по формуванню програмного забезпечення автотранспортних підприємств;
- позитивними результатами впровадження науково-методичних положень у практику керування вантажними магістральними автомобільними перевезеннями;
- моделюванням систем керування магістральними вантажними перевезеннями з урахуванням розмаїття обмежень параметрів у реальних виробничих умовах.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці програмно-інструментального комплексу з оптимізації структури і параметрів ТП, на основі запропонованих у дисертації науково-методичного забезпечення по управлінню вантажними перевезеннями. Спроектована й заповнена база даних про МТМ, що містить у собі параметри основних транспортних вузлів, а також технічні характеристики транспортних сполучень, дає змогу за допомогою програмного комплексу вирішувати найрізноманітніші завдання по оптимальному керуванню вантажними перевезеннями в межах великого автомобільного транспортного підприємства. Програмний комплекс може бути інтегрований в чинні на підприємствах системи керування процесами, такі як 1С Транспорт, TransTrade та інші.

Для запропонованого методу розподілу наявного парку АТЗ по відомих завданнях з перевезення вантажів на МТМ розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення, яке пройшло автономну та комплексну перевірку на багатьох підприємствах, серед яких слід особливо відзначити ТзОВ «Транс-Сервіс-1», ТОВ «Орлан Транс Груп», «ЛВ Транс», «Агрологістик» та інші.

Використання сучасних інформаційних технологій у вигляді розробленого програмного комплексу і методу оптимізації при плануванні магістральних перевезень дає змогу приблизно на 20..25 % знизити витрати часу на здійснення цих перевезень, вдвічі скоротити час затримок доставки вантажів

у транспортних вузлах, а також вибирати більш раціональні режими руху, автоматизувати операції зі складання плану вантажних перевезень.

З метою вдосконалення та розвитку системи контролю по керуванню міжміськими автомобільними вантажними перевезеннями була запропонована методика раціональної організації роботи вантажного терміналу, яка забезпечує мінімальні витрати часу на обслуговування АТЗ та збільшує пропускну здатність МТМ.

При виконанні науково-дослідницьких робіт по держбюджетній НДР №0107U009529, зокрема її розділу «Оптимізація транспортно-технологічних схем організації магістральних перевезень» було розроблено нову модель керування комплексними міжміськими перевезеннями вантажів. У результаті були спроектовані:

- інформаційне забезпечення основних компонентів МТМ, – транспортних вузлів і комунікацій;

- програмне забезпечення автоматизованої системи управління комплексними вантажними перевезеннями на МТМ;

- автоматизована система контролю автомобільних перевезень вантажів сукупністю АТЗ, які взаємодіють для досягнення вищої ефективності процесів. Впровадження цих розробок має економічний і соціально-політичний ефекти, а також значно сприяє підвищенню конкурентноздатності вітчизняних АТП при виконанні міжнародних автомобільних перевезень.

Основні наукові й практичні результати дисертації впроваджені в навчальний процес ряду провідних вищих навчальних закладів Міністерства освіти і науки України, а саме: у Національному університеті «Львівська політехніка», Національному транспортному університеті, Національному авіаційному університеті, Східно-українському університеті ім. Даля.

Особистий внесок здобувача. Особисто автором опубліковано 40 одноосібних робіт. У наукових працях, опублікованих із співавторами, особистий внесок полягає в такому:

в [3] розроблено теоретичну модель, методику оптимізації, виконано експериментальні дослідження;

в [5] виконано огляд попереднього доробку, розроблено алгоритм і програму імітаційного моделювання, зібрано початкові дані;

в [6] розроблено алгоритм і програму імітаційного моделювання, підготовлено вхідні дані та виконано перевірку моделі на адекватність;

в [7], [8] розроблено алгоритми імітаційного моделювання, підготовлено початкові дані та виконано аналіз циклічних потоків;

в [9] розроблено методику, алгоритм та обробку отриманих результатів моделювання;

в [10], [11] виконано моделювання процесів;

в [13] розроблено методику оптимізації, підготовлено початкові дані, побудовано залежності, зроблено висновки;

в [18] запропоновано засади теорії автоматизації системи керування, розроблено методику досліджень, здійснено математичне моделювання;

в [21] розроблено теоретичну модель, здійснено обробку експериментальних даних;

в [23] виконано аналіз проблеми, здійснено огляд попереднього доробку, розроблено методику моделювання;

в [25] запропоновано ідею імітаційної моделі;

в [33] запропоновано класифікаційні ознаки ТТС, розроблено методику дослідження, побудовано залежності;

в [34] розроблено математичну модель, комп’ютерну програму для розрахунку, заплановано і виконано модельний експеримент;

в [35] розроблено методику досліджень;

в [37] розроблено методику досліджень і комп'ютерну програму;

в [38] зроблено огляд літератури, побудовано теоретичну модель, виконано оптимізацію, проаналізовано залежності;

в [40] розроблено структуру системи, перевірено її експериментально, перевірено адекватність;

в [45] виконано огляд попереднього доробку, розроблено методику досліджень, виконано моделювання, проведено аналіз результатів;

в [61] виконано перевірку адекватності моделей;

в [62], [63], [64], [65], [66] розроблено алгоритми і написано комп'ютерні програми.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на таких наукових форумах:

- симпозіум Українських інженерів-механіків у Львові 2011, 2015, 2017 рр.,
- Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених та студентів «Проблеми і перспективи розвитку автомобільної галузі» 2011 р. (Донецьк);
- наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, 2010-2019 рр. (Київ, НТУ);
- Всеукраїнська науково-практична конференція «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні» 2015, 2017, 2019 (Львів);
- Міжнародна науково-практична конференція “Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту” 2015, 2019 (Вінниця);
- Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та молодих вчених «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» 2015, (Харків);
- Міжнародна науково-практична конференція «Міські і регіональні транспортні проблеми», 2015 (Харків);
- Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми підготовки професійних кадрів з логістики в умовах глобального конкурентного середовища», 2013, 2016, 2018, (Київ, НАУ);
- VIII-ї міжнародна науково-практична конференція «Транспорт і логістика: проблеми та рішення» 2018 (Одеса);
- XI міжнародна науково-практична конференція „Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту” 2016, 2018 (Житомир);

- Міжнародна науково-практична конференція «Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців» 2017 (Харків, ХНАДУ);
- наукова конференція «Транспортні системи та технології: проблеми та перспективи розвитку» 2018 (Запоріжжя);
- International Scientific Technical conference “Current problems of transport” ICCPT 2019 (Тернопіль);
- International Scientific Conference TRANSPORT PROBLEMS, 2016, 2017, 2019 (Катовіце, Польща);
- 2-га Міжнародна науково-практична конференція «Енергооптимальні технології, логістика та безпека на транспорті», 2019 (Львів).

Публікації. У процесі виконання дисертаційної роботи теоретичні та практичні положення опубліковано в 66 наукових працях, із них: 2 колективні монографії; 9 праць – у закордонних виданнях, у тому числі 1 – одноосібна; 6 статей включені до міжнародних наукометричних баз Скопус, у тому числі 1 – одноосібна; 26 статтей опубліковано у фахових виданнях України, у тому числі 16 – одноосібних, 28 праць – апробаційного характеру, з них 22 – одноосібні; 5 свідоцтв авторського права.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи складає 462 сторінки, у тому числі основного тексту 310 сторінок. Робота ілюстрована 116 рисунками, наведено 14 таблиць. Додатки розміщені в на 93 сторінках. Перелік використаних літературних джерел складається із 354 найменувань на 40 сторінках.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ОРГАНІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ПРОЦЕСІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

1.1 Сучасні проблеми міжміських та міжнародних автомобільних перевезень вантажів

За даними статистики в Європейських країнах спостерігається найбільший розвиток індивідуального та дрібносерійного виробництва за останнє десятиріччя [67]. Це призводить до збільшення загального обсягу перевезень, в тому числі і автомобільним транспортом. Стосовно вантажообігу, то європейський автомобільний вантажний транспорт збільшився: на 4,5% з 2016 по 2017 рік, на 7,8% з 2017 по 2018 рік і на 5,3% з 2018 по 2019 рік. У 2017 році європейський автомобільний вантажний транспорт мав найбільші темпи зростання, зафіксовані за останні 5 років. У цілому він збільшився на 11,8% з 2013 по 2019 рік. Ця тенденція утримується і впродовж останніх трьох років.

Внутрішні перевезення в країнах ЄС становлять 63,5% від загального обсягу вантажних перевезень. Зафіксовано 9,9% зростання з 2013 по 2017 рік, і 7,6% – з 2017 по 2019 рік. Транзитні та каботажні перевезення, які становлять 12,1% від загального обсягу перевезень, за період 2013 по 2019 роки продемонстрували високе та постійне зростання на 38,5% [68]. Одними з найбільш значущих країн для автомобільного транспорту в Європі з 2017 по 2019 роки були Литва, Польща, Греція, з частками від загального пробігу в ЄС, відповідно, 26,2%, 17,5%, 15,5%. Кіпр, та Польща були державами-членами ЄС, які зафіксували найбільший приріст вантажообігу, виконаний з 2016 по 2019 рік. Значна частка вантажообігу дорожніми транспортними засобами припадає на міжміські та міжнародні маршрути.

Деякі з таких європейських тенденцій намітились і в Україні [69, 70, 71, 72]. Зокрема, динаміку показників використання автомобільного транспорту від 2010 року подано на рис. 1.1.

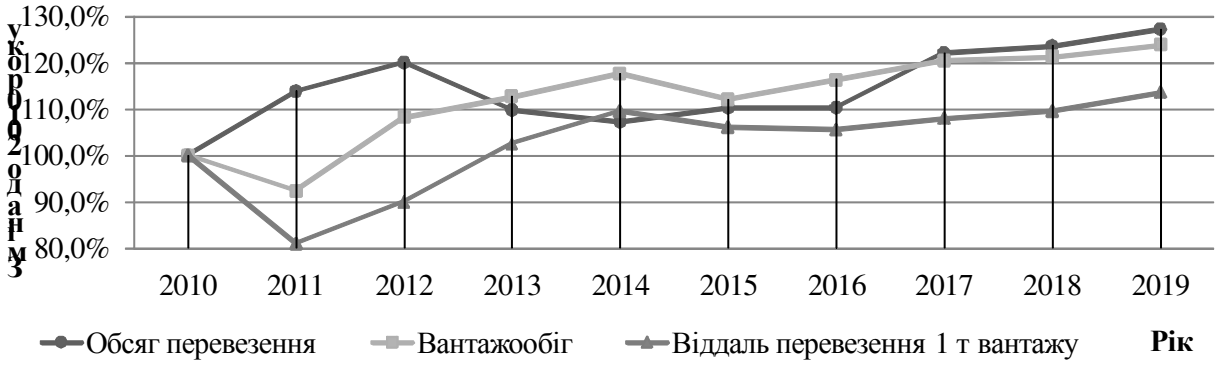


Рисунок 1.1 – Динаміка показників використання вантажного автомобільного транспорту України

З рисунку видно, що обсяги перевезення вантажів, які спостерігались до 2014 року відновились до 2018 року і перевищують їх у 2019 році. Вантажообіг має стійку тенденцію до зростання, незважаючи на минулий кризовий період. Ця тенденція спостерігається останніми роками. Так, у січні-листопаді 2019 р. вантажообіг дорожного транспорту в Україні становив 311,0 млрд. ткм, або 102,4% від обсягу аналогічного періоду 2018 р. [72]. Дані стосовно дальності перевезення 1 т вантажу свідчать, що в структурі вантажних перевезень автомобільного транспорту в Європі чільне місце займають магістральні перевезення. Така ж тенденція впродовж останніх 10 років, крім 2015 р., також спостерігається і в Україні. Отже, одна з виразних ознак сучасної економіки – зростання частки автомобільного транспорту в міжміському і міжнародному товарообігу [72, 73].

В роботі [74] показано, що задоволення попиту на міжміські вантажні перевезення, що зростає в Україні, відбувалося через збільшення кількості малих та середніх транспортних компаній, а ще більшими темпами – через оновлення і збільшення чисельності саме магістральних автопоїздів. Однак, дослідниками не було відмічено, що збільшення загальної кількості одиниць рухомого складу не приводить до пропорційного збільшення їх провізної спроможності. Крім того, збільшення чисельності малих транспортних компаній в Україні – це наслідок штучного поділу підприємств з метою мінімі-

зації податків [78]. Кількість нових зареєстрованих АТП в Україні зменшується [79].

При вказаних тенденціях зростає як внутрішня, так і зовнішня конкуренція на ринку транспортних послуг. Також парк АТЗ, хоч і оновлюється, все ж залишається із застарілими одиницями, які знижують його конкурентоздатність та надійність використання. Проте головна причина низької продуктивності вантажних автомобілів та автопоїздів на міжміських маршрутах – відсутність чіткої взаємодії їх екіпажів та координації відносно доступної для них інформації. Так, починаючи з 2014 до 2017 року пробіг вантажних автомобілів по Україні з вантажем зростав від 4042,5 до 6031,3 млн. км і до 6332 млн. км – у 2019 році. Пробіг без вантажу, змінювався, відповідно – від 1767,8 до 3460,3 млн. км до 2017 року і до 3021,4 млн. км – у 2019 році, тобто коефіцієнт використання пробігу зменшувався від 0,56 до 0,42, а потім зростав до 0,67. [80]. Період 2014-2017 років характеризується головними ознаками негативної організації транспортних процесів – низькими коефіцієнтами пробігу і випуску АТЗ внаслідок стрімкого зростання кількості АТП в Україні. Водночас, з'єднуючі ланки, – логістичні компанії починають розвиватись лише з 2015 року. На 2019 рік в Україні лише утвердились за значимістю компанії, що надають логістичні послуги 3PL і відсутні з функціями 4PL 5PL, у той час, коли такі компанії є масовими в світі [74, 78, 79].

Особливості організації міжміських автомобільних вантажних перевезень в сучасних умовах є достатньо повно досліджені [81]. Однак є досить невелика кількість робіт, які відмічають, що у сучасних транспортних процесах міжміської великогуртової доставки вантажів час також став дуже вагомим ресурсом. Це пов'язано із зростанням вантажообігу, значною конкуренцією АТП, обмеженнями режимів експлуатації автопоїздів та роботи їх екіпажів. Поки що він використовується нераціонально (рис. 1.2). Проведені дослідження показують, що вимушені простої автотранспорту на міжміських і міжнародних маршрутах у великій мірі залежать від властивостей маршрутів. Загалом ці простої досягають 75% тривалості транспортного циклу. Однак,

на довгих міжнародних маршрутах спостерігається зростання частки міжзмінного відпочинку водіїв.

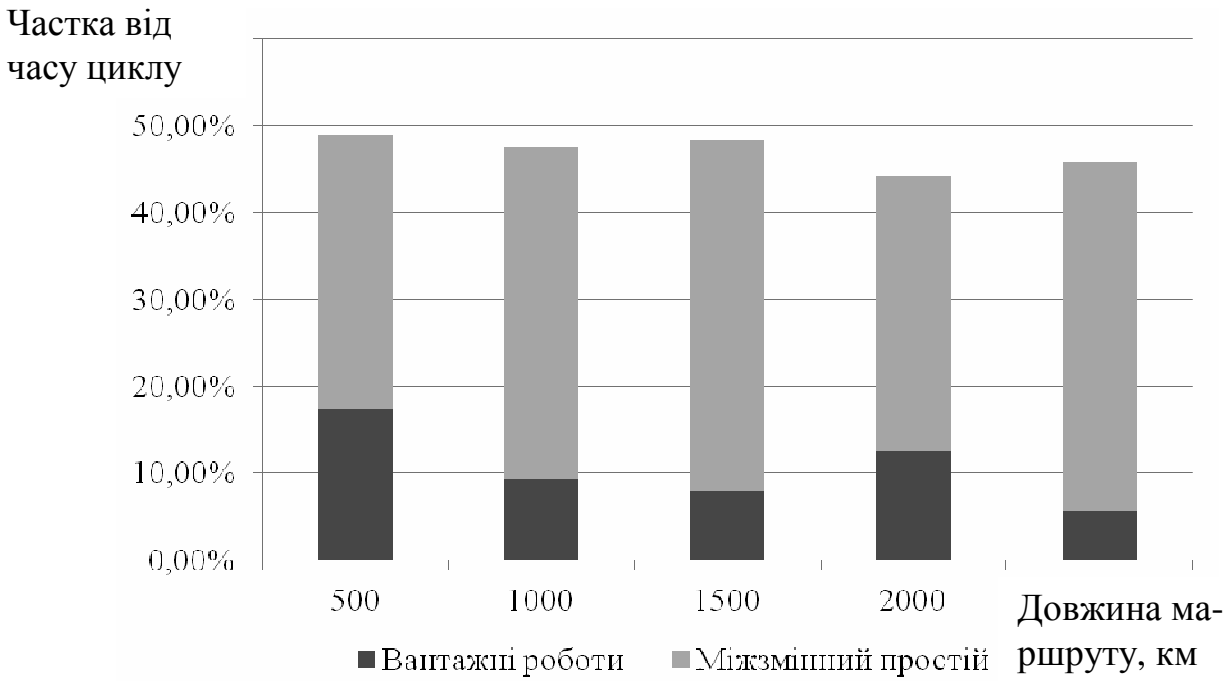


Рисунок 1.2 – Залежність структури окремих втрат часу на міжміські перевезення вантажів від довжини маршруту (авторські дослідження)

На більшості міжміських маршрутів (500-700 км) структура часу циклу є такою, як подано на рис. 1.3.

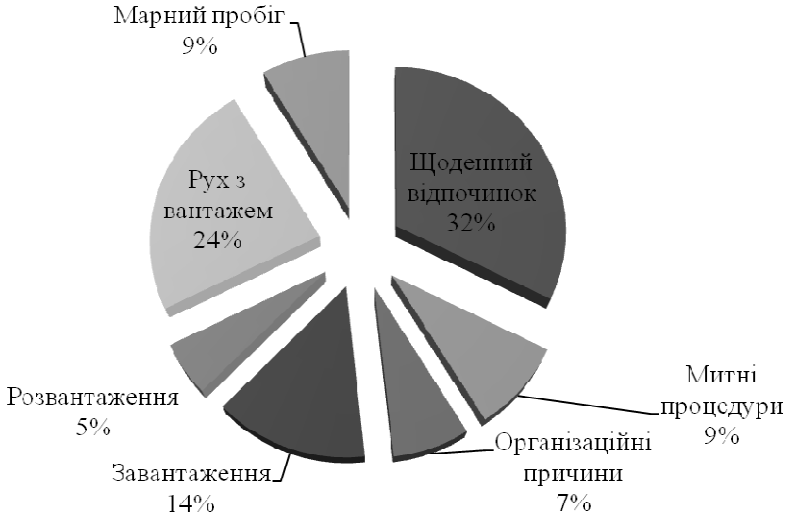


Рисунок 1.3 – Структура часу циклу міжміських та міжнародних вантажних перевезень автомобільним транспортом (авторські дослідження)

Організація міжміських автомобільних перевезень також має певні особливості, які підвищують проблему продуктивності парку вантажних авто-

мобілів. Це, по-перше, – значна віддаль від пунктів відправлення до приймання вантажів, при якій тривалість усього процесу залежить від моменту відправлення і прибуття автопоїзда у місце доставки вантажу. По-друге, це – незавантажений пробіг АТЗ, який значно здорожчує транспортування, тому перевізники не можуть його допускати. І по-третє, це – широкий географічний розподіл пунктів утворення і поглинання вантажопотоків, через який розроблення і дотримання розкладу має вагомі обмеження. У зв'язку зі значною конкуренцією АТП проблема продуктивності значно загострилась. При невідповідності умов надання послуг, або недотриманні гарантованих параметрів процесу настають відмови. В широких масштабах країни вони приводять до неефективного використання рухомого складу і до затримок в доставці вантажів. Орієнтовний середній коефіцієнт випуску парку магістральних АТЗ по Україні становить 0,45..0,66, а середня швидкість доставки вантажів у міжміському сполученні, залежно від типу вантажів – 26..34 км/год [79]. Тому відмови, з одного боку, можуть бути спричинені перевізником, який не дотримується термінів поставки та якості перевезення. З іншого, – перевізник може відмовитись від виконання заявки через відсутність практичної вигоди. В умовах жорсткої конкуренції перевізників відмови сприймаються їх клієнтами як причина скасування подальшої співпраці. Як наслідок, надходження наступних замовлень на перевезення скорочується.

Водночас, у нашій державі продовжує формуватись цивілізований ринок перевезень, відбувається певна стабілізація ринкових відносин, що дає автомобільним перевізникам можливість закріпити свої позиції і на міжнародному ринку, де існує ще жорсткіша конкуренція. Проте, сталому розвитку виробничих відносин постійно перешкоджають зміни у зовнішньому регуляторному впливі на транспортну галузь, який зрідка лише відображає об'єктивні закономірності перебігу транспортних процесів [80].

Останнім часом робота міжміських та міжнародних автоперевізників під впливом низки чинників ускладнюється. Фінансове навантаження на них впродовж 2015-2019 років значно зросло через низку причин: стрімко зросли

ціни на паливно-мастильні матеріали, підвищились ставки податку з власників транспортних засобів, деякими іноземними країнами введено додаткові дорожні збори та обмеження на ввезення палива, існують додаткові витрати та обмеження, пов'язані з необхідністю оформлення дозволів та інші перепони [80].

Логістика та інформаційні технології є ключовими для підвищення конкурентоспроможності та сталого зростання транспорту і промисловості в цілому. Сьогодні зусилля багатьох підприємств скеровані на створення власних логістичних підрозділів, або інтеграцію в регіональні логістичні центри [81]. Це випливає з економічної необхідності. Фірмові логістичні центри почали розвиватись у Європі з 1980-х років, що було пов'язано з хвилею банкрутств підприємств гуртової торгівлі. Банкрутували, переважно фірми середніх і малих розмірів, що мали застарілу організаційну структуру і великий штат співробітників. Вижили, в основному, великі фірми, які мали достатні фінансові кошти для реорганізації і створення логістичних центрів, що підвищили ефективність їх роботи. Вижили також дрібні фірми, що мали сучасну гнучку виробничу структуру. В той же час створювалися нові дрібні й середні фірми з логістичними центрами, простою і економічною організаційною структурою. Такий позитивний досвід, часто без обмежень, намагаються застосувати українські підприємства. Найбільших успіхів, як правило, домагаються великі фірми, що використовують сучасні методи управління. Позитивні ж результати дрібних підприємств, очевидно залежать від змісту інтеграційних процесів. Це означає, що існує потреба описати ці процеси з допомогою параметричних моделей. Але, оскільки при цьому використовується підхід декомпозиції складної системи, то суть ефекту від централізації транспортно-складських операцій формалізувати поки що не вдається [76, 82].

До цього часу з функціями інформаційного забезпечення і керування транспортними процесами успішно справлялись логістичні оператори 4-го покоління (надають послуги 4PL). Найкращі 4 з них походять з ЄС та поза світовим середовищем Топ-10. Семеро з них знаходяться в ЄС у 2014 та 2016

роках відповідно [83]. Однак, є прогнози, що в найближчі 10-15 років 90% від зростання світової економіки відбуватиметься поза межами ЄС [75-85]. Тому країни ЄС зацікавлені у тому, щоб їх компанії залишалися конкурентоспроможними та могли отримати доступ до нових ринків та отримати вигоду з цих джерел зростання. Це вимагає застосування широкого спектру інформаційних технологій та нового підходу до формування транспортних систем (ТС).

Характерною рисою міжнародних автомобільних перевезень вантажів є великий пробіг АТЗ на маршрутах [81]. Для підвищення ефективності даного виду перевезень необхідно приділяти особливу увагу процесу пошуку і вибору зворотних завантажених їздок. Завдання перевезення вантажів в попутному / зворотному напрямках є частково вирішеним, що пов'язано з розвитком транспортно-інформаційних порталів в мережі Internet. Однак проблема вибору раціонального варіанту перевезення з множини альтернативних залишається актуальною [85]. Рішення про прийняття того чи іншого вантажу до перевезення в даний час приймається менеджерами перевізників на основі інтуїтивних, заснованих на особистому практичному досвіді рішень. Як правило, такі стратегії прийняття рішення про вибір раціональної зворотньої їздки зводяться до того, що автомобіль перевозить той вантаж, час очікування якого – мінімальний. У роботі [83] пропонуються нові, засновані на обробці статистичної інформації стратегії прийняття рішення про вибір раціонального зворотного перевезення. Проте, в якості методики автори дослідження вибрали статистичне моделювання, яке дало змогу прийняти лише одну з альтернативних стратегій побудови транспортного циклу для усього парку АТЗ загалом. Це є недеталізована методика і вона не дає змогу виробити гнучку стратегію в умовах, коли є можливість скористатись доступною інформацією. Автори статті [83] розглядають організацію виконання випадкових разових замовлень. Однією з причин широкої популярності використання вантажовласниками такої форми укладання договорів як «разове замовлення» є

потужний розвиток інформаційних технологій, що спричинив появу та успішне функціонування спеціалізованих логістичних сайтів.

У дисертації [84] здобувач застосовує теорію системи масового обслуговування (СМО) для планування сукупності таких замовлень, а для верифікації застосовує ІМ. Проте, сумнівними видаються припущення автора про найпростіший потік таких замовлень, особливо, якщо йдеться про спеціалізовані вантажі, обслуговування невеликого регіону, або використання малого парку транспортних засобів. В дисертації [84] також не враховано, що замовлення мають допустимі терміни виконання, так звані часові вікна, в межах яких лише можна їх виконати, інакше замовлення переходить до конкурента. Зрештою, як результат, в роботі пропонуються три стратегії роботи перевізника. Однак не враховується, що ринок вантажоперевезень може бути з ситуаційною перевагою пропозиції над попитом, або навпаки.

В дорожній карті розвитку магістрального автомобільного транспорту вказується, що застосування ІТС може вирішити актуальні проблеми магістральних вантажних перевезень [86]. Однак це вимагає ретельнішого підходу до аналізу оперативної інформації, прийняття рішень та контролю за їх виконанням. У цьому плані Україна повинна орієнтуватись на передові країни ЄС, його товаровиробників і транспортно-логістичні фірми. Вони, хоч становлять чималу конкуренцію, однак для них об’єктивних перешкод до інтеграції українських перевізників в європейський ринок немає [85]. Зиски, які можуть бути здобуті Україною від транспортної інтеграції, будуть як прямими, так і опосередкованими. Прямі вигоди є менш очевидними, але доступними: збільшення можливості доступу до ринків, збільшення обсягу перевезень та експорту транспортних послуг, притік капіталу, модернізація інфраструктури, пряме постачання ресурсів з ЄС, бюджетна підтримка. Опосердковані вигоди є більш доступними: покращений розподіл продуктивних факторів, перерозподіл вантажопотоків, покращення ефективності економічних процесів транспортних та обслуговуючих підприємств, підвищення стандартів надан-

ня транспортних послуг та рівня безпеки транспорту, скорочення бар'єрів у відносинах між державами ЄС [86].

Великі європейські автомобільні перевізники зустрічаються з проблемою недовантаження своїх парків через нерівномірність потоку замовлень, малу пропускну здатність вантажних терміналів, а у більшості випадків – через несистемність планування транспортних процесів. Подібна ситуація характерна і для України. Крім вказаних недоліків, тут ще можна відмітити низький фактичний рівень індустріалізації та стандартизації в сегменті транспортного забезпечення. Процеси постачання товарів залежать від попиту з дуже коротким передбачуваним розкладом. Характерний також достатньо низький рівень визначеності планування. Недостатність інформації про хронологічну та географічну появу наступних замовлень робить проблемою ефективне використання АТЗ і забезпечення відповідності режимів роботи і відпочинку водіїв.

Оскільки провізна здатність парків АТЗ значно перевищує обсяги замовлень на виконання міжміських автомобільних вантажних перевезень то, всупереч зусиллям менеджменту транспортних компаній, їх операційні витрати щороку зростають [74]. Українські перевізники, наприклад, намагаються скоротити марний пробіг автомобілів. Вони застосовують різноманітні інформаційні системи для прогнозування попиту, планування розкладу окремих екіпажів [87, 88]. Найбільш популярніші з них можуть виконувати чимало функцій, серед яких: пошук і вибір замовників, вільних автомобілів, складання маршрутів, оформлення документів, обчислення вартості поїздок та інші. Ці системи дають змогу зменшити простої та марний пробіг окремих автомобілів. Однак, більшість управлінських рішень перевізників є несистемними. Натомість АТП отримують недовикористання, простої й, навіть, зриви виконання замовлень. Неминучі при цьому – штрафні санкції вантажовласників. Адже підприємства не беруть до уваги засадничі директиви середніх і великих ТС, в яких АТЗ можуть використовуватись максимально ефективно [89]. Тому задачі їх ефективної експлуатації повинні розв'язуватись в нових

умовах. По-перше, окремі АТЗ парку мають бути скоординованими. По-друге, замовлення на перевезення вантажів повинні мати системний характер, найкраще – циклічний. По-третє, інформацію про виникнення й властивості замовлень потрібно використовувати якомога ефективніше.

Перевізники, які користуються інформаційними автоматизованими системами, прогнозують замовлення наперед і розподіляють по них наявні АТЗ. Так їм вдається частково уникнути непродуктивних витрат на перевезення. Однак, динаміка виконання замовлень впродовж планового періоду є значною. Нерідко вони є взаємозалежними. Це накладає додаткові обмеження на розклад руху автопоїздів, які обслуговують замовників. Зміст проблеми організації перевезень сучасними парками АТЗ полягає в тому, що до них висуваються дві суперечні вимоги. З одного боку, робота сукупності АТЗ має відповідати отриманій інформації про потенційні вантажопотоки і забезпечити якомога повніше задоволення відомого попиту. Пробіг без вантажу при цьому виключається. З іншого боку, складна структура єдиного ТП для парку АТЗ, які взаємодіють, має випадковий та циклічний характер [89]. Це приводить до вимушених простоїв автопоїздів через неузгодженість розкладу їх роботи. У зв’язку з цим існує, очевидно, такий розклад, який є оптимальним за вказаними критеріями і обмеженнями.

На думку вчених, проблеми такого роду вирішуються у контексті впровадження ІТС, тобто системи, що самоорганізується, та автоматизованої логістики, що забезпечується інтермодальними перевезеннями і ефективним використанням інфраструктури у всіх режимах [89-91]. Дорожні карти Європейської дорожньо-транспортної дослідницької дорадчої комісії (The European Road Transport Research Advisory Council – ERTRAC) наголошують на тому, що міжміські та регіональні вантажні перевезення повинні стати ще більш стійкішими, з одночасним збереженням прозорості та доступності для користувачів та учасників системи [92].

Оскільки вантажівки перевозять понад 71% всього вантажу, що перевозиться сушею то сектор великовантажних АТЗ є основою ефективного ван-

тажного транспорту в Європі, причому цей сектор сприяє подальшій інтеграції різних частин Європи. Сьогодні щорічні наукові звіти дослідників відмічають такі тенденції:

- на дорогах Європи експлуатується, приблизно, 29 млн. автопоїздів і вони використовуються для міжміських магістральних перевезень;
- шкідливі викиди від важковагових автомобілів зростають і становлять майже чверть усіх викидів наземного транспорту; до 2030 року прогнозують зростання викидів CO_2 до 10%;
- через збільшення кількості АТЗ на магістралях зростають затори на дорогах і затримки в транспортних пунктах [93].

Втратам часу АТЗ під час руху на магістральних дорогах поки що не приділялось значної уваги. Тим не менше, затори на дорогах в ЄС часто трапляються як в міських районах так і навколо них, і щорічно вартують майже 100 мільярдів євро додаткових видатків, тобто, приблизно, 1% ВВП ЄС. Оскільки існують обмеження щодо того, як можна розбудувати нову дорожню інфраструктуру, тому, що існує великий попит на збільшення тривалості експлуатації доріг, проблема затримок і заторів буде ще більше посилюватись щодо покращення використання існуючої пропускної спроможності магістральної транспортної мережі [94]. Виконання проекту Falcon / CEDR наголошує, що існуюча європейська інфраструктура не зможе забезпечити зростаючий потік вантажів майже на 40% для майбутнього зростання попиту на транспорт і ризик серйозних перевантажених перевезень буде неминучим [95]. Цьому можуть сприяти також нові способи організації вантажного транспорту та логістики з метою подолання зростаючої електронної комерції, нових технологій (наприклад, автоматизації руху вантажних автомобілів та процесів), а також нових тенденцій в організації роботи, що впливають на навколишнє середовище. Для підвищення ефективності експлуатації та уникнення перевантаженості МТМ важливим є «безшовний вантажний транспорт» [82].

Вантажні перевезення повинні поступово розвиватися як інтегровані пакети послуг з доставки товарів і сировини, збільшуючи коефіцієнт навантаження, уникаючи марних пробігів і поступово перетворюючись на єдиний інформаційний простір. Реалізація можливостей використання цифрової інформації на МТМ є ключовим фактором стабільної доставки товарів [96].

Ще одним ключовим моментом міжміських перевезень вантажів є створення мультимодальних рішень, що сприяють стандартизації та автоматизації процесів навантаження та розвантаження для мінімізації часу перевантаження та складності між різними видами транспорту. Наприклад, комунікація між «розумними» транспортними засобами та інфраструктурою вимагає гармонізованого розвитку інфраструктури, а також відповідних інвестицій національних, регіональних та місцевих органів влади, приватного сектору. Своєчасне передбачення та ранній початок цих заходів є надзвичайно важливим.

Відповідно до прогнозів ERTRAC SRA 2050 та Інтегрованої транспортної системи ALICE, загальною метою вантажного дорожного транспорту є розробка доступних та ефективних рішень з доставки вантажів для європейських громадян. Це включає інтелектуальні логістичні рішення, розумні комодальні інфраструктури та роботизовану доставку вантажів. Згідно цього бачення ланцюг поставок у майбутньому повинен бути безперервним, злагодженим і екологічно безпечним [97].

Важливою складовою ефективності є уникнення порожніх пробігів чи недоотриманих транспортних засобів. Відповідно до звіту проекту AEROFLEX-27, оптимізація завантаження транспортних засобів стосується скорочення порожнього пробігу, оскільки на рівні ЄС-28 чверть усіх поїздок здійснювали порожні транспортні засоби (25,4% – у 2016 році). Частка порожніх пробігів зросла до 30,3% у внутрішніх перевезеннях, але у міжнародному транспорті у 2018 році становить лише 14,3% [98].

Що стосується пріоритетів впровадження автоматизованого керування магістральним транспортом до 2030 року, то вищий рівень автоматизації пе-

редбачається в обмежених районах та пунктах, де транспортне середовище є передбачуване, середня швидкість руху АТЗ – порівняно низька, а рух транспорту можна повністю контролювати [94].

Складність інформаційних технологій, їх застосування, підключення та впровадження автоматизації для керування АТЗ та інфраструктури постійно зростає. Це є вагомою перешкодою для впровадження ІТС. Важливо також розробити стратегії прийняття рішень стосовно оперативного керування автомобілем, зокрема для вантажних АТЗ великої вантажомісткості. Конвергенція транспортних та інформаційних систем є пріоритетним завданням наукових досліджень в Європі. Важливим є розвиток і впровадження надійних, взаємодоповнюючих та дуже надійних систем контролю та технологій позиціонування автомобіля [98].

Витрати на оплату праці складає від 35 до 45% експлуатаційних витрат на міжміські вантажні перевезення в Європі [69]. Крім того, обмеження часу, за яким водій може їздити впродовж певного дня або тижня, обмежують швидкість і доступність вантажівки на великі відстані, де окремі водії прикріпляються до кожної одиниці рухомого складу. У той же час, вантажоперевізники можуть боротися за залучення водіїв до таких поїздок на далекі відстані. Очевидно, що можливість, відкрита автоматизацією ТП, змінює початкові витрати на оплату праці, та послабляє обмеження часу на поїздки, підвищує продуктивність АТЗ, викликала б великий інтерес для АТП та їх клієнтів, не забуваючи про те, що водій все ще залишатиметься ключовим суб’єктом ТП [99].

Автоматизовані транспортні засоби дають можливість здійснити революцію в галузі магістральних перевезень. При правильному використанні автоматизовані комерційні вантажні АТЗ можуть підвищити ефективність, гнучкість і загальну прибутковість експлуатації автопарку. Це також має великий потенціал для ефективного зниження витрат, пов’язаних із поїздками через насичені потоки автомобілів, поліпшення поведінки водіїв, зниження витрат на оплату праці водія та збільшення мобільності парку, а також задля їх безпеки. Згідно з доповіддю Міжнародного союзу автомобільного транспорту (*The International Road and Transport Union* (IRU)) «Управління пере-

ходом до автомобільного вантажного транспорту без водіїв» за 2017 рік, скорочення експлуатаційних витрат, ймовірно, буде значно вищим у вантажних перевезеннях на великі відстані, де оплата праці становить більшу частку бази витрат, ніж у міських вантажних перевезеннях. В цілому, до 30% зниження експлуатаційних витрат на вантажні перевезення на великі відстані можливі при експлуатації без водія [93].

Розширення систем управління транспортними потоками, взаємодія між центрами управління дорожнім рухом, постачальниками послуг та окремими транспортними засобами, повинні оптимально поєднувати інформацію, що надходить з пункту відправлення, інформацію про дорожній рух та постачальника послуг з планування та оптимізації магістральних вантажних перевезень [97].

Для підвищення ефективності вантажних перевезень доступно більше обсягів даних, деякі з них зібрані в «розумну» інфраструктуру, оснащені різними сенсорами, підключені до мереж передачі [100]. Ці дані можуть бути пов’язані з тими, що надходять з транспортних засобів та інших джерел для різних цілей:

1) для оцінки взаємодії транспортних засобів та інфраструктури;

2) для сприяння експлуатації транспортного засобу, надання деяких послуг або підвищення його безпеки;

3) щоб оцінити вплив транспортних засобів на інфраструктуру, можливі пошкодження дорожного одягу та термін його експлуатації;

4) щоб забезпечити постійний моніторинг руху та інфраструктури.

Тому моніторинг, діагностика та обслуговування дорожньої інфраструктури мають вирішальне значення для посилення існуючих обмежень. Наприклад, збір даних на основі зважування в русі (Weight Into Movement (WIM)) на автомагістралях та інших автомобільних дорогах дає змогу проводити профілактику, зекономити кошти, не порушуючи експлуатації МТМ в цілому [100].

Бортовий моніторинг АТЗ (наприклад, зважування в русі, вимірювання сили тертя на дорозі / шині, оцінка коефіцієнта опору кочення дає дані, які

можуть використовуватися для сталої оцінки інфраструктури і, таким чином, проводиться ефективна діагностика ТП в ході його виконання. Для цього потрібен високий рівень зв'язку між стаціонарними та мобільними об'єктами ТП, та зв'язку між транспортним засобом та інфраструктурою в цілому. Такий точний і постійний моніторинг потрібен для забезпечення вищих навантажень або інтенсивності руху, більш тривалого терміну експлуатації, але для збереження прийнятих коефіцієнтів безпеки, в цілому – для більшої продуктивності АТЗ.

У науковому звіті IRU «Управління переходом до автомобільного вантажного транспорту без водіїв за 2017 рік описано 4 сценарії розвитку автоматизованих систем управління на автомобільному транспорті:

1) базовий – передбачає впровадження вантажівок без водіїв на дорогах загального користування протягом наступних 20 років;

2) консервативний – передбачає, що технологія без водіїв повільно впроваджується з 2030 року, спочатку на декількох ділянках міжміських магістралей, та з 2033 року – у декількох містах Європи та США;

3) регламентований – передбачає, що технологія без водіїв буде дозволена на всіх міжміських маршрутах з 2028 року та в містах – з 2030; у вантажних перевезеннях на великі відстані технологія є всюди поширеною впродовж трьох-п'яти років, тоді як у містах впровадження її є менш інтенсивне;

4) розривний – передбачає, що технологія без водіїв впроваджується лише на половині міжміських маршрутів з 2021 року (і прогресивно розширюється), а також у містах – з 2022 року [97].

Сучасні засоби телекомунікації, які застосовуються в ІТС, надають інформацію про рух автомобілів як у містах, так на міжміських дорогах. Така послуга вважається однією з найбільш затребуваних в сучасності [101]. Завдяки телеметричним засобам реалізовується можливість точно спланувати маршрут, визначити час руху, спрогнозувати затримки транспортного потоку, а також виконати необхідні управлінські розпорядження щодо взаємодії парку автомобілів на МТМ. У вироблення рішень закладається необхідний критерій оцінки запланованих дій та ймовірність досягнення його рівня. Головні показники високої ефективності ІТС – точність і достовірність наданої

інформації. З іншого боку, сучасне інформаційне забезпечення є високовартісним. Наприклад, вартість інсталяції відео-детекторів на магістралях (найбільш популярніші засоби в ІТС) коштувало в 2012-2016 рр. у різних країнах від $45 тис. до $75 тис. на один км дороги [102]. Крім того, дорогим є обслуговування інформаційних систем.

Точність наданої інформації на даний час залежить не тільки від похибки отриманих сигналів. Так, наприклад, 2-3% похибка GPS навігатора є цілком задовільною і допустимою для того, щоб прийняти рішення про вибір програми руху [101]. Тут під програмою руху розуміємо зміну швидкості відносно спрогнозованих дорожніх і транспортних умов. Якщо розглянути міжміські поїздки автомобілів по МТМ, то програма руху тут може тривати декілька годин. За цей час умови руху змінюються досить динамічно. В межах довготермінового планування оперативної інформації про транспортні умови є недостатньо. У зв'язку з цим оптимальні програми руху лише зрідка виконуються. Натомість заплановані розклади руху зриваються, терміни доставки вантажів значно перевищують об'єктивно досяжні.

На даний час ідея запровадження інтелектуальних транспортних систем в Європі та в Америці вважається дуже перспективною, адже вона вирішує чимало проблем транспорту [102]. Однак, її стримує високий рівень капіталовкладень, який, до того ж, не має гарантованого повернення коштів. Мова йде про невизначеність стосовно ефективності отриманої інформації на автомагістралях. Тому актуальною задачею є обґрунтування потужності інформаційних потоків, які сприймає водій, або автоматизована бортова система керування АТЗ і використовує їх для досягнення поставлених цілей перевезення.

Однією із актуальних задач в організації руху магістральних АТЗ є вибір і дотримання швидкісного режиму. У публікації [103] представлені аналітичні моделі та методи оцінки потоку інформації, засновані на технології сприйняття мобільних даних, які надходять від АТЗ. Мета дослідження була отримати рішення з низькими витратами на впровадження ІТС. Запропоновані аналітичні моделі використовуються для аналізу взаємозв'язку між інформацією про рух (трафіком, щільністю та швидкістю руху) та кількістю сигналів стільникових мереж. Інформацію про трафік можна оцінити на основі запро-

понованих аналітичних моделей даних про транспортний засіб стільникового зв'язку (Cellular Floating Vehicle Data). Крім того, пропонується метод прогнозування швидкості руху АТЗ, заснований на алгоритмі нейронної мережі зворотного поширення. Подібні моделі дають змогу досить ретельно проаналізувати вхідні дані, та передбачити майбутню швидкість руху автомобіля для учасників дорожнього руху [104-109]. Однак більшість відомих досліджень стосуються лише короткотермінового прогнозування. Крім того, засобами прогнозування мають бути оснащені як транспортні засоби та інші суб'єкти дорожнього руху, так і об'єкти транспортної інфраструктури. Результати досліджень і методика може бути корисною в межах міських ІТС.

На даний час відомі і розвиваються три напрямки розвитку технологій отримання інформації на борту магістрального АТЗ. Засоби збирання інформації відрізняються принципами генерування сигналів. Однак, застосування жодного з відомих засобів без інтегрованої системи не відповідає вимогам точності та просторово-часової ємності інформаційного потоку. Наприклад, дані відеокамер (як сенсорів відстані) є цілком задовільні для оцінювання щільності потоку [102, 103]. Здебільшого усі нові інформаційні технології на автомобільному транспорті базуються на взаємній «комунікації» між учасниками дорожнього руху, а також з нерухомими дорожніми об'єктами. Адже саме завдяки обміну інформацією отримана можливість покращити вірогідність та точність прогнозування [104]. У іншому прикладі дослідження використовується довша ділянка автомобільної дороги з внутрішніми заторами [105]. Було виконано завдання перевірити здатність запропонованої схеми оцінювання трафіку для створення відповідних оцінок для зміни умов руху на великій ділянці магістралі. В обох випадках результати виявились задовільними, якщо говорити про переваги «комунікації» АТЗ. Однак моделі, що базуються на періодичному аналізі швидкостей мають один вагомий недолік, як це було виявлено в роботі [105]. Швидкості АТЗ, визначені за відносно короткими періодами спостережень, характеризуються, насправді, великими прискореннями / сповільненнями. У фазових траєкторіях за даними спостережень, ці похибки не були помічені.

В дослідженні [106] показано, що обмеження, які накладаються на вибір швидкості АТЗ, залежать від умов руху. Виконано класифікацію умов на дорожні і транспортні. Також зроблено аналіз об'єктів дорожнього руху, які можуть бути джерелами повідомлень про обмеження дорожніх і транспорт-

них умов. Матеріал відомих досліджень не охоплює, нажаль, задач, пов'язаних з обґрунтуванням ефективності застосування отриманої інформації [111-115]. Така фрагментарність наукових та проектних зусиль стосовно впровадження ІТС на МТМ в Європі і в Україні приносить більше шкоди, ніж користі для розвитку ІТС. Тому лише поєднання європейських зусиль дасть найбільшу загальноєвропейську практичну вигоду у таких сферах, як комплексні системи управління та інформації на транспорті, які полегшують послуги інтелектуальної мобільності, організацію перевезень для кращого використання інфраструктури та транспортних засобів, та інформаційні системи у режимі реального часу для відстеження та спостереження за вантажами та управління вантажними потоками; системи інформації для вантажовідправників та системи оплати праці [101].

1.2 Розвиток системного підходу до організації процесів магістральних перевезень

1.2.1 Оптимізація ТП. Завдання оптимізації структури ТП, експлуатації АТЗ, режимів роботи водіїв, а також розвитку складних систем, якою є Європейська автомобільна МТМ, є комплексними і набувають сьогодні особливо великого значення. Основний шлях їх розв'язання вбачають в розвитку методів оперативного керування [101, 110], а також створення ІТС [111, 115]. Це, в свою чергу, приводить до необхідності обґрунтування системи керування сукупністю транспортних процесів.

Дослідження організації роботи виробничо-транспортних комплексів і оптимізація їх параметрів знайшли відображення в роботах А.І. Воркута, А. О. Смєхова, Л. Б. Міротіна , П. Г. Гріневича, Б. Ф. Брагіна, Г. І. Нечаєва; організації роботи транспорту – В. М.Акулінічева, В. Т. Осипова, Ю. Н. Кожевникова; питань керування процесами вантажної роботи – Повороженка В.В., Ферапонтова Г.В., Котенка А. М., Житкова В.А. й інших.

Принципову відмінність в підходах до оптимізації транспортного процесу містять праці В.І.Николіна, В.К. Долі, Ю. М. Неруша, Т. А. Воркут, Л. Б. Міротіна, О. В. Сидорчука, Н.І. Чухрай. ТП вони розглядали як скінчену множину операцій, що мають просторово-часові взаємозв'язки і утворюють впорядковану певним чином структуру, яка підпорядкована єдиному органі-

заційному режиму – ритму, або оберненою до нього величиною, – такту. Це дало змогу цим дослідникам і їх послідовникам визначити нелінійні залежності показників ефективності використання АТЗ та кількісних характеристик їх парків. Проте така теорія, нажаль, не набула подальшого розвитку. Адже, залежно від критеріїв, умов і змінних дискретну систему, якою є ТП, можна впорядкувати, обґрунтувавши доцільні зв'язки її елементів. У більшості відомих робіт, нажаль, не враховано того, що транспортні процеси – це дискретні, циклічні, або квазіциклічні але *відкриті системи* [116, 117]. В міру зростання складності їх ентропія не зростає, що пояснюється проявом системного ефекту на основі обміну інформації [118-123]. Отже, впорядкування транспортних процесів потрібно вирішувати поряд з т.з. *ідейною складовою*.

Теоретичні основи підвищення ефективності використання рухомого складу в ТП подано в роботах Л. Л. Афанасьєва, Л. А. Бронштейна, Д. П. Великанова, А. І. Воркута, Б. Л. Геронімуса, М. Я. Говорущенка, Л. Г. Зайончика, П. Р. Левковця, В. К. Мироненка, М. М. Маяка, А. О. Чеботаєва, Ю. М. Цвєтова та ін. [124-131] Переважна більшість робіт базується на методах статистичного аналізу, теорії СМО. Стосовно сучасних наявних телеметричних засобів на автомобільному транспорті ці методи є застарілими, бо не дають задовільних результатів. Це ж можна сказати про методологію формування парку АТЗ за умов детермінованого / випадкового попиту, яку започаткував професор Воркут А.І. і продовжують його послідовники [124]. Стрижнем їх методології залишається лінійне / стохастичне програмування. Коли обсяги початкових даних задач зростають, то доводиться застосовувати методи стохастичної оптимізації (евристичні методи).

1.2.2 Маршрутизація. Питанням маршрутизації транспортних засобів вчені приділяли увагу впродовж уже понад 60 років. В новому формулюванні маршрутизація залишається актуальною для керування ТП і тепер. Задачі, які розв'язувались раніше, поступово ускладнювались з метою наблизитись до реальних умов транспортування пасажирів та вантажів [124-127, 134-140, 142]. В останні роки спостерігається зростання інтересу до задач *динамічної*

маршрутизації, так само, як і складання он-лайн розкладів для операторів транспортного процесу [123]. 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 й достовірні розв'язки задачі маршрутизації, які змінюються в часі.

Науковій проблемі керування вантажними перевезеннями на транспортних мережах різної структури і розмірності, які враховують обмеження на пропускні здатності їх транспортних вузлів і комунікацій, незбалансованість по обсягах перевезень вантажу, взаємодію різних видів транспорту присвячені роботи В. Д. Данчука, Г.С. Прокудіна та їх учнів [135-138]. Також значний вклад у цьому напрямку досліджень зробили українські та російські вчені: Канторович Л.В., Зайченко Ю.П., Кремер Н.Ш., та багато інших. Стосовно засадничих методів оптимізації маршрутів перевезень вантажів слід відзначити роботи Данцінга Г., Ляпорте Ж., Потвіна Д.-Ю., Воркута А.І., Четверухіна Б.М., Бідняка М.Н., Сільянова В.В., Лігума Ю.С., та інших. Але, незважаючи на всю багатогранність розгляду проблематики мережевих транспортних задач, щодо оптимізації процесів перевезень і значимість отриманих результатів, необхідно зазначити, що вони залишаються статичними і в умовах великих потоків даних втрачають акутальність.

Застосування інформаційних і телекомунікаційних технологій перетворило методологію складання маршрутів у вузьке місце, враховуючи випадкові фактори. Так, зокрема показано, що використання великої кількості сенсорів, розпаралелення процесу та впровадження хмарних технологій в керуванні ТП значно збільшує потік інформації, який обробляють застарілими методами [140]. Тому прихід інтелектуальних технологій на транспорті стримується чинною методологією.

Загальний огляд формулювань різних задач маршрутизації був зроблений в публікаціях закордонних вчених [141-149]. Маршрутизацію транспортних засобів відносять до задач комбінаторного аналізу й поділяють за досту-

пністю й вірогідністю інформаційних потоків на статичну, динамічну і стохастичну. Статична маршрутизація була досить повно опрацьована в попередніх роботах, однак її розв'язки втрачають актуальність у зв'язку із переходом транспортних диспетчерів на оперативні методи контролю [146]. 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 здатностей парків АТЗ, а зустрівши непередбачені обставини, зазнають чималих економічних втрат. У сучасних виробничих ситуаціях відбуваються події, під час планування ТП, 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 маршуртизації, що 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 Psaraftis H. N. у 1988 році [145]. В роботах Madsen B. G. [149], Jaillet P., Wagner MR., Schorpp S. і Pillac V., а також Huang Z.C., Hu X.L., Chen S.D. [150], де 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 [151], метод «табу» на окрему множину рішень [152], інші евристичні методи, докладний огляд яких зроблено в праці [146]. Евристичний метод – термін стосується методу розв'язування задачі, правильність якого на кожному кроці невідома або не може бути підтверджена.

У міру зростання потоку інформації методи динамічної маршрутизації з врахуванням фактору часу, а саме часових допусків, так званих часових вікон, стають менш ефективними. Це було доведено і в роботі Larsen A. і

Madsen B., Solomon M. [157], де вони показали, 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 дослідники запропонували застосовувати сортування замовлень з врахуванням терміновості їх виконання і витрат часу для цього. Також у роботі [151], а також в роботі Karsten L., Madsen O. B. G., Rygaard J. M. [149] було запропоновано оцінювати складність задачі 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 керування вантажними перевезеннями на мережі.

Задачі стохастичної маршрутизації, переважно, стосуються випадкових чинників, які приводять до непередбачених змін тривалості руху, простою та очікування. Достатньо повний огляд сучасних розробок у методології цього напряму зроблено в працях норвезьких дослідників Ульріке Рітцінгєра, Якоба Пучінґера, Річарда Хартла [146]. 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 маршрутизації призвела до збільшення наукових інтересів впродовж останніх років. Завдяки останнім досягненням інформаційних та комунікаційних технологій цей новий клас проблем дає змогу точніше обробляти реальні потоки вхідних даних. Перевагою є те, що крім ефективної обробки динамічних подій розглядається стохастичне знання про виявлені події. Флетберґ та інші вчені [152, 153] здійснили огляд і удосконалили методику розв’язку задач такого змішаного типу, але основну увагу вони приділили, власне, динамічним задачам, тоді як Ріцінґер дає огляд динамічних і стохастичних задач маршрутизації транспортного за-

собу, але з виключним акцентом на різних гібридних методах, застосованих до цієї галузі.

1.2.3 Оптимізація вантажопотоків. Сучасні ТП є такими складними, що їх функціонування важко, а у деяких випадках – неможливо адекватно описати звичайними лінійними, або випуклими нелінійними моделями. Задачі, які виникають в нових умовах, – це оптимізація дискретних потоків в мережах, для яких поки що немає загальної теорії та універсальних методів. Як вихід, використовують динамічне програмування, евристичні методи, нейронні мережі, тобто такі засоби, які не дають гарантованого оптимального розв'язку, але наближують до нього з певною точністю. Крім того, для оптимізації функціонування ТС, переважно, використовують декомпозицію загального виробничого завдання на часткові, методики розв'язання яких є відомими: маршрутизація, оптимізація вантажопотоків, розподіл наявних транспортних засобів по відомих роботах, координація транспортних і допоміжних засобів. Це знижує точність розрахунків і робить керівні рішення непрактичними. З іншого боку, розвиток ТС супроводжується інтеграцією окремих процесів. Тому традиційна транспортна задача (ТЗ) та її модифікації стають такими, що практично не можуть бути застосованими через надмірну абстрагованість. На практиці АТП не є суб'єктом прийняття рішень, тому вони сприймають готову інформацію про вантажопотоки, які є, переважно, невзаємозамінними. Задача про закріплення тут втрачає зміст [154]. Обсяг початкової достовірної прогнозної інформації для кожного конкретного перевізника є випадковою величиною. Параметри її розподілу залежать від періоду, якого стосується інформація. Саме опираючись на таку інформацію, перевізники виконують розподіл парку транспортних засобів на відомі замовлення. В кожному випадку, використовуючи її сподівану характеристику, потрібно диференційовано підходити до формулювання виробничих задач. Оскільки в теорії є прогалини стосовно цих питань, то на практиці виникає проблема недовикористання провізних спроможностей автотранспортних парків. Кількість транспортних засобів значно перевищує їх об'єктивну потребу. Водно-

час, реальний вантажообіг значно перевищує об'єктивно необхідний, що є наслідком використання недосконалих ТП.

ТЗ у класичному формулюванні зазнала чимало змін, пов'язаних з адаптацією її до реальних логістичних процесів [122, 154, 155]. Відомі також постановки задачі при неоднорідних вантажопотоках і обмеженнях на допустимий час доставки [156]. Однак, сучасні умови виконання вантажних перевезень вимагають вищої оперативності й автоматизації отримання розв'язків, використання великих баз даних, комунікації між об'єктами ТП. Не усі з відомих методів цілком відповідають цим умовам.

Задачі про потоки на мережах є достатньо повно опрацьовані в працях дослідників і мають широке застосування на практиці. Серед них особливої уваги заслуговують задачі розподілу ресурсів на транспортних мережах при наявності факторів невизначеності [137, 154, 157, 158]. Такі задачі мають розв'язок як сепарабельні, нелінійного програмування. Основною невизначеністю у них є пропускні здатності зв'язків транспортної мережі, які, до того ж, залежать від розподілених ресурсів. Іншими словами, це – невизначеність стосовно обмежень. Якщо ж розглядати невизначеність щодо потенційних вантажопотоків, то методики розв'язків таких задач поки що невідомі.

Є лише деякі роботи, в яких були спроби розглянути задачу про потоки на мережі в динаміці, тобто при зміні тривалості періоду, коли є інформація про інтенсивність потоку [159]. Проте, вони стосуються перспективного планування розвитку транспортних мереж і для оперативного планування не можуть бути застосовані.

Відомими є праці, де розглядались математичні моделі формування інтегрованої схеми доставки. Вона дала змогу, з одного боку, однозначно проектувати маршрут доставки для кожного вантажопотоку, з іншого – врахувати можливість сумісного проходження вантажопотоків по шляхах сполучення з метою зниження витрат ресурсів. Така модель об'єднує обмеження, які стосуються оптимізації потоків окремих гуртів вантажів, що розв'язувались методом пошуку найкоротших ланцюгів між двома заданими вершинами графа

заданої мережі [161]. Такий підхід не має цілковитої адекватності розв'язків, тому що наявність декількох гуртів відправки в одному транспортному пункті передбачає, формально, декілька транспортних циклів.

Можна погодитись з тим, що в багатьох працях сучасний ТП визнано як складну систему, для якої характерні є синергетичні ефекти. Такі процеси тепер охоплюють інтегровані ланцюги постачання продукції, які мають складні структури. Ланцюги постачань продукції досліджені в недавніх працях Воркут Т.А., Куниці А.В., Горяінова Л. Л., Міротина Л. Б., Неруша Ю.М., Наумова В.С. та інших вчених. Багато зроблено ними у встановленні закономірностей перетворення вантажопотоків на транспортній мережі, на основі чого окреслено перспективи їх розвитку та керування. Дехто з дослідників обмежується аналізом тих потоків, які вже практично склалися через вплив фінансових потоків та інших суб'єктивних чинників [155]. Зокрема, чимало є сучасних публікацій, які не завжди об'єктивно виокремлюють перевагу терміналів та логістичних центрів – найновіших продуктів організації каналів збуту і постачання. Більшість дослідників акцентують на першочерговості зниження грошових витрат, безвідносно до якості послуг [81, 162, 163, 165]. Інші ж, навпаки – переймаються зниженням тривалості доставки без врахування вірогідних витрат на це, або ж коливання попиту [166, 167].

При дослідженні синергетичного ефекту, пов'язаного з інтеграцією елементів ТП було розглянуто задачу формування інтегрованої системи доставки для множини невзаємозамінних вантажів [168]. Кожен вантажопотік розглядався як заданий і такий, що складається з допустимих l гуртів відправки. Кожному гурту $q_{i.j.l}$ поставлено у відповідність набір індексів i – пункт відправлення, j – пункт призначення, l – номер гурту вантажу. В роботі [168] авторка цю складність обминула, застосовуючи, знову ж таки, декомпозицію та агрегування загальної задачі. Відомо, що при такій декомпозиції гарантований оптимум не забезпечується, натомість його замінюють нижньою оцінкою.

У кожній з дотепер відомих задач оптимізації потоків на мережах об'єктами впорядкування є одиничні (нециклічні) потоки, які потрібно опрацювати впродовж обмеженого і, як правило, відомого фіксованого періоду [155, 170, 171]. У деяких роботах враховано динамічність постачання: зміну попиту в часі. Так було запропоновано методику організації поштучних дрібногуртових перевезень за умов коливання попиту [172]. Раціональна схема маршрутів може змінюватись залежно від потужності матеріального потоку (МП). Це супроводжується зміною структури і розміру логістичних витрат. На основі складання найкоротших зв'язуючих мереж та розв'язування для них транспортних задач отримано ТП з гнучкою структурою. Але достатньої гнучкості лише маршрутизацією досягти неможливо. Адже при фіксованій кількості пунктів роздрібного споживання продукції, які потрібно обслужити, скоротити пробіг транспортних засобів за рахунок оптимізації черговості їх об'їзду по найкоротшій мережі можна зменшити на 15-20% лише транспортні витрати. При цьому не враховується, що гарантований термін доставки може не дотримуватись, а використання усіх інших ресурсів (складів, навантажувальних засобів, пакетів та пакетоформуючих засобів) не береться до уваги. Потрібно розглянути, що найбільш ефективний метод підвищення ефективності функціонування транспортних систем на МТМ – це оптимізація структури ТП [162].

Проблемам синтезу ефективного ТП, який може забезпечити виконання завдань доставки вантажів від заданого виробничого підрозділу до одного, чи декількох споживачів на розподіленій транспортній мережі присвячено чимало робіт українських та закордонних вчених. Більш ранні дослідження розглядали ТП окремо від виробництва і споживання товарів, а також ізольовано один від одного [111, 145, 167]. Транспортно-складські комплекси описувались при цьому лінійними залежностями в обмеженій області визначення змінних [124]. Такі системи у сучасності є застарілими. Згодом, коли з'явились дослідження середніх та великих ТС, виникла потреба аналізу складніших залежностей, що пов'язані з обмеженнями на пропускні здатнос-

ті транспортної мережі, наявністю розгалужень матеріальних потоків, використанням термінальних технологій та значним ростом ролі інформаційних технологій в керуванні процесами [169]. В роботах Нагорного Є. В., Нєфьодова В. М., Горяінова О. М., Прокудіна Г. С., Шраменко Н. Ю., Крикавського Є. В., та інших вчених дано теоретичні основи для аналізу і синтезу процесів доставки вантажів на МТМ, із застосуванням розподільчих центрів, терміналів та декомпозиції загальної складної моделі на простіші. При цьому проблемам синтезу великих та середніх ТС у вітчизняних наукових дослідженнях приділялось все ще мало уваги. Серед закордонних потрібно відмітити роботи Кристофера М., Уотерса Д., Діснея С., Іванова Д., Чанг Ю., та інших. В жодній з опублікованих праць, що стосуються керування вантажними перевезеннями, не враховано, що транспортні потоки мають дискретний характер, а задачі їх оптимізації є нелінійними. Для них властиві багатоекстремальність, дискретність, велика розмірність, невипуклість, що робить їх складними для аналізу. В зв'язку з відсутністю відповідної теорії поки що немає більш ефективних методів, ніж евристичні. Одним з шляхів розв'язання складних нелінійних транспортних задач є їх декомпозиція на простіші та агрегування [159]. Алгоритми, що пропонуються, є придатними для залізничної транспортної мережі, де дотримання розкладів робіт здійснюється з меншими допустими відхиленнями. В автомобільних перевезеннях транспортні операції – події з більшим рівнем невизначеності. Вони є більш роззосередженими, мають слабші часові зв'язки. Крім того, транспортні пункти для автомобільного транспорту – це магістральна транспортна мережа, яка володіє складними властивостями і впливає на формування магістральних потоків. Тому динамічне програмування в даному випадку – непридатне.

Розглядаючи рух вантажів у системі взаємопов'язаних матеріальних потоків, можна відмітити, що в літературних джерелах здійснюють ідентифікацію такої системи для того, щоб визначити класи задач, які потрібно розв'язати. В цьому відношенні надзвичайно корисною була класифікація ТС, запропонована В. І. Ніколіним [89]. Згідно з його твердженнями, *великі*

ТС відрізняються потенційними можливостями, які можна використати, якщо упорядкувати їх структуру. В жодній з відомих дотепер праць такі системи детально не досліджені. Проте, у згаданих дослідженнях Ніколіна В. І. та в роботах інших авторів основним для ТС подібного рівня пропонується метод статистичного моделювання, який не забезпечує прогресивних рішень. Вагомим недоліком згаданої класифікації було також те, що послідовності операцій з доставки товарів споживачам, які об'єднані в середні, великі, чи особливо великі ТС, розглядались окремо від виробництва, складування, споживання, тобто охоплювали не повний ЛЛ. Великі ТС відносяться, як правило, до потокових і об'єднують в єдине ціле декілька ЛЛ постачання. Вони формуються залежно від попиту на кінцеву готову продукцію і є багатопредметними. Вхідна інформація про прогнозовані потоки замовлень, які мають стохастичний характер, є неповною. Дуже часто ЛЛ в таких системах перетинаються, розгалужуються, а у просторі – ще й на досить великій географічній території. Тому багатьма дослідниками наголошується, що керування такими системами постачання пов'язане з багатовимірними задачами, невизначеністю і ризиками [170].

Дотепер недостатньо дослідженими залишаються процеси динаміки матеріальних потоків у циклічних ТП. Вивчення потоків в транспортних системах має, переважно, теоретичний характер [172, 173]. В прикладних дослідженнях дослідників найбільше приваблюють найпростіші потоки, тобто такі, для яких виконуються умови стаціонарності, ординарності і відсутності післядії [175]. Моделлю найпростішого потоку є стаціонарний пуассонівський процес. На базі цієї моделі для найпростіших потоків розроблено аналітичні та статистичні методи їх досліджень, які досить повно описані в літературі. Проте, на практиці, не для всіх потоків виконуються перераховані вище умови, тобто не всі потоки можуть бути зведені тільки до найпростіших. Найчастіше порушується умова стаціонарності. Своєю чергою, серед нестаціонарних потоків увагу привертають потоки, характерною ознакою яких є стохастична періодичність [176]. Адже навіть у випадку, коли для стохастич-

но періодичного потоку виконуються умови ординарності та відсутності післядії, їх моделлю все одно є пуассонівський періодичний потік. Крім того, дослідження періодичних потоків є цікавим з погляду можливості поступового удосконалення отриманих приблизних розв'язків на кожному наступному кроці, що відповідає періоду ітерації системи. Потік називають *стохастично періодичним*, якщо періодичними (зі сталим періодом) є його певні параметри, які можуть бути випадковими величинами. Такими характеристиками для потоків з обмеженою післядією можуть бути одновимірні функції розподілів [177]. Що стосується стохастично періодичних потоків пуассонівського типу, то періодичним є їх параметр інтенсивності μ , тобто існує таке число T і така функція $f(\mu)$, що $f(\mu)= f(\mu+T)$.

Підсумовуючи виконаний огляд досліджень, виділимо головні ознаки, які характерні для сучасних вантажопотоків на МТМ – це інтегрованість, циклічність, наявність нелінійних характеристик, та невизначеностей.

1.2.4 Розклади руху автомобілів та автопоїздів. Практичне значення для організації ТП на МТМ має чіткий розклад виконання логістичних операцій [178]. Донедавна розуміння «розклад руху АТЗ» стосувалось, переважно, пасажирських транспортних засобів, а саме міського пасажирського транспорту [179]. Побудова циклічних розкладів для однієї або декількох груп ідентичних робіт також набула значної актуальності й відрізняється від традиційних моделей вимогою побудови розкладу для нескінченної кількості робіт на нескінченній, або напівнескінченній осі часу. Природно, що в цьому випадку не працюють класичні критерії, такі як максимум або сума тривалостей закінчення робіт, мінімум кількості невчасно виконаних задач, та інші. Зазвичай, якість розкладів для таких завдань характеризується щільністю, тривалістю циклу виконання кожної роботи та інше [180].

Активно розвиваються такі класичні методи теорії розкладів, як «гілок і меж» (і його численні модифікації) [181, 169, 182, 183]; динамічного програмування; лінійного програмування і багатофакторний аналіз; локального пошуку; геометричні методи, засновані на аналізі властивостей векторних сі-

мейств в скінченно-вимірних нормованих просторах [170, 184, 185]. Графоорієнтовані методи спираються на зведення завдань побудови розкладів до розмальовки графів і мультиграфів і до аналізу властивостей цих графів. Глобальною проблемою теорії розкладів (як і дискретної оптимізації в цілому) є встановлення складності того, чи іншого завдання. Залежно від складності й підбирають алгоритми. При цьому складність завдання є функцією від багатьох параметрів, від яких, в принципі, залежить дана задача, і хотілося б знати повний спектр значень цієї функції, що дає змогу зробити висновок про те, як складність завдання залежить від тих, чи інших параметрів, або від комбінації їх значень. Комбінування двох завдань різних типів також може докорінно вплинути на складність отримання результату. Наприклад, при деяких значеннях параметрів задачі *open shop* (для кожного транспортного засобу задана своя підмножина замовлень, кожна з яких має виконуватись деякий час) і *job shop* (для кожного транспортного засобу задана своя впорядкована підмножина замовлень (маршрут), які він повинен виконувати в заданому порядку) можуть бути окремо поліноміально розв’язаними, але їх змішання призводить до виникнення істотно складнішої (NP-важкої в сильному сенсі) задачі. Задача відноситься до класу NP-складних, якщо вона є NP-повною або невідомий недетермінований алгоритм, що розв'язує її за поліноміальний час, [170]. Для розв'язання NP-складної задачі не існує поліноміального алгоритму. Таким чином, саме «змішання» завдань різних типів також є певним параметром завдання [182]. Відомі засоби диспетчеризації вантажних перевезень, на жаль, не мають функцій формування розкладів і маршрутів транспорту так, щоб вони мали задовільну складність процедури і точність розв’язку за прийнятний час [186-195].

Залишаються слабо вивченими з точки зору аналізу їх складності та побудови точних і наближених алгоритмів розв’язання такі теоретичні проблеми, що мають серйозну прикладну значимість для транспортної галузі, як завдання *open shop* з маршрутизацією машин [197]. У зв’язку з тим, що сучасні транспортні технології досягли високого рівня і масштабів, навіть незначні

затримки стають домінуючим фактором, що визначає ефективність парку транспортних засобів. Традиційні методи їх маршрутизації, що дають гарні результати в термінах довжини зв'язків і мінімізації щільності, не можуть гарантувати виконання вимог до швидкодії транспортних систем. Через це останнім часом особлива увага приділяється способам врахування тимчасових обмежень на етапі глобальної маршрутизації [182, 183]. Початкове рішення будується за алгоритмом пошуку дерева Штейнера, що враховує тимчасові обмеження [193]. Далі для поліпшення рішення використовується ітераційний підхід, коли розриваються мережі, що проходять через ребра з найбільшою щільністю. Завдання повторної маршрутизації формулюється як задача про багатопродуктовий потік і вирішується за допомогою ієрархічного алгоритму. Рівномірність розподілу продуктивності транспортних засобів досягається максимізацією рівномірності глобального потоку й мінімізацією максимальної щільності [182].

Для комплексної маршрутизації і складання розкладу магістральних автопоїздів найбільш придатною за сучасними проблемами є задача комівояжера (ЗК), яка на теперішній час має понад 500 різних формулювань і розв'язків. Однак, навіть до найбільш наближеного варіанту, з метою її практичного застосування, необхідно додати такі умови: динамічні зміни вхідних даних; можлива відсутність шляху з одноразовим проходженням усіх вузлів мережі; частково невідомі вхідні дані; асиметричність задачі [140]. Такі умови роблять відомі методи розв'язання ЗК неможливим. Їх було частково вирішено в роботі [184]. Авторами було прийнято, що ЗК є задачею динамічного характеру, тобто динамічна задача, потребує статичного розв'язання в умовах змін початкових даних, зникнення або появи нової інформації, а також зміни її розмірності. Наступними природними модифікаціями класичної ЗК є такі, в яких потрібно знайти два або кілька маршрутів мінімальної або максимальної сумарної довжини, які не мають спільного перетину. Одним з найактуальніших є завдання про m подорожуючих комівояжерів (m-*peripatetic salesman problem* m-PSP), яке також є NP-важким в сильному зміс-

ті при $m>2$. Для завдання відшукання наближеного рішення задачі 2-PSP на максимум на повному n-вершинному графі із симетричною матрицею відстаней транспортної мережі є відомі алгоритми з часовою складністю $O(n^3)$ (кубічна кількість операцій обчислення від кількості вершин) і гарантованою оцінкою точності [195]. Результатом постійного пошуку найефективніших методів розв'язку ЗК стало використання еволюційних та генетичних алгоритмів [140]. Результати деяких експериментальних досліджень довели високу продуктивність цих алгоритмів, а на деяких контрольних прикладах – їх безперечну перевагу над існуючими методами математичного програмування. Однак, ці алгоритми потребують ще доопрацювання щодо різноманітності вхідних даних.

Циклічні розклади грають важливу роль в організації ТП. Вони забезпечують ритмічність завантаження устаткування, транспортних засобів і виконавців, дають змогу ефективно планувати як поставки ресурсів, так і збуту продукції. Складність завдань побудови циклічних розкладів з різними технологічними обмеженнями досліджувалася в роботах [185, 198, 199] та деяких інших. Оптимальний циклічний розклад для множини транспортних екіпажів можна скласти в цілому швидше, ніж єдиний – для кожного з них зокрема, або, навіть, для усіх наявних транспортних засобів. Однак методику складання циклічного мультирозкладу з маршрутизацією, викладений в роботі [195], не можна використати для досягнення поставленої нами мети, бо він передбачає обов'язкові періоди простою транспортних засобів (літаків), пов'язані з відпочинком їх екіпажів. Більшість розглянутих завдань цього типу є NP-важкими в сильному сенсі [170]. Деякі дослідники вважають за доцільне будувати наближені й евристичні алгоритми їх вирішення. Раніше для цього завдання був запропонований метод «гілок і меж» [183]. Представлений алгоритм є досить адекватним, але в іншому випадку він надто складний, щоб бути успішним, обчисленим користувачами.

Незважаючи на актуальність і важливість завдання, в даний час не існує методів, які здійснюють побудову алгоритму і маршрутизацію, що задоволь-

няє одночасно часові критерії і обмеження на пропускні здатності ребер, а також загальну довжину маршруту, що пов'язано з транспортними витратами. Таким чином, проблеми маршрутизації і складання розкладів автопоїздів утворюють більш складні комплексні задачі. Їх розв’язок ускладнюється тим, що потрібно враховувати додаткові перешкоди, що виникають у виконанні транспортного завдання. Динаміка розкладу при цьому змінюється.

Кожен відомий тип задачі може бути таким, що поліноміально розв’язується залежно від попередньо опрацьованих даних [200, 201, 202]. Однак їх суміщення приводить до такого типу задачі, яка є суттєво складніша. Складність таких комбінованих задач є маловивченою.

1.2.5 Інформаційне забезпечення транспортного процесу. Сучасні вітчизняні та закордонні дослідження мають мету удосконалити засоби телематики для позиціонування АТЗ у великих містах. Їх недоліками вважають недостатню «видимість», необхідність коректування повідомлень у зв’язку з виникненням додаткових завад [205]. Нажаль інших задач, крім позиціонування, на навігаційні системи досі не покладають [217]. Звідси випливає, що, всупереч своїм можливостям, AVL (automatic vehicle location) системи не запобігають затримкам у дорозі, відхиленням від оптимальних програм руху, невчасній доставці вантажу. Телеметричні засоби наділяють також функціями локального позиціонування. Так, Європейська Комісія своїм законом дозволила оснащувати автомобілі портативними радарами ближньої дії (Automotive Short Range Radar (SRR)). Раніше передбачалося, що масове використання радіочастотного електронного устаткування ускладнить ефір і без цього забитий мобільним, супутниковим зв’язком. Дослідження підтвердили, що небезпеки не існує і навпаки нововведення здатне у багато разів скоротити кількість зіткнень на дорогах. SRR – автомобільні радари здатні фіксувати виникаючу перешкоду на відстані від 0,4 до 30 метрів при швидкості автомобіля до 120 км/год. і попереджати про них водія. Подібна система безпеки може бути наділена функціями самостійної дії на гальма або кермове керування при необхідності. Крім того, до додаткових переваг SRR можна віднес-

ти допомогу водієві при паркуванні або автоматичне регулювання швидкості при русі. Для автомобільних радарів законом встановлена радіочастота 24 GHz. Після 2013 р., коли кількість оснащених радарами машин на дорогах зросла до критичного для інших електронних систем рівня, колишня частота замінена на 79 GHz. При цьому "видимість" досягла не менше, ніж 150 м [221].

Телекомунікаційні сигнали можуть передаватися не тільки від супутників. Відомі проекти, коли при створенні мережі диспетчерських центрів сигнали про параметри руху передають системи стільникового зв'язку за допомогою програмного забезпечення, що працює з мережами GSM (Global System for Mobile Communications). Отримана інформація повідомляється учасникам руху. Унікальним для цієї системи є те, що зберігається анонімність власників телефонів. Система ввійшла у дію у деяких країнах Європи і Америки ще у 2003 році [221].

Відомі дослідження, які скеровані на розвиток інформаційних технологій моніторингу автомобільних доріг [218, 219]. В основі цих технологій закладено бортові інформаційно-аналітичні комплекси, які отримують, обробляють і порівнюють інформацію у повідомленнях від різних джерел (у тому числі – від GPS) [217]. З такими розробками вдосконалюється процес дослідження стану транспортних комунікацій, що полегшує задачі маршрутизації. Проте, аналіз транспортних умов з допомогою таких комплексів не проводиться. В період зростання завантаженості автомобільних комунікацій без цього аналізу задача вибору маршруту переростає в тривіальну.

Більшість сучасних досліджень спрямовані на створення інтелектуальних транспортних засобів, які рухатимуться по інтелектуальних транспортних мережах. Відомі, наприклад, проекти автономних автомобілів і їх організованого руху в колонах [222]. Були виконані оцінки водієм дорожньо-транспортної обстановки і вибору ним швидкості. Доведено, що водій, як найбільш інерційна ланка схеми керування системою «водій-автомобіль-дорога-середовище» (ВАДС), робить такий вибір залежно від інформаційно-

го поля, яке є не завжди сприятливе [223, 224]. Усі дослідження по ІТС є цілком обґрунтованими, особливо тим, що понад 70% усіх причин ДТП пов'язані із людським фактором [224]. Багато вчених переконані в тому, що обмеження обсягу рішень по керуванню АТЗ, які покладаються на водія, є більш перспективним напрямком, ніж дослідження психо-фізіологічних особливостей процесу прийняття ним рішень [222, 225]. У зв'язку з цим при побудові моделі прогнозування режимів руху АТЗ потрібно відсторонитись від випадкових чинників, пов'язаних із суб'єктивним вибором оператора.

Чимало статей присвячено прогнозуванню швидкості руху АТЗ на автомобільній магістральній дорозі. Надання точних оцінок швидкості і її зв'язку з параметрами транспортного потоку є основними завданнями транспортного моделювання. Більш уважний погляд на природу цього завдання вказує на те, що швидкість є, по суті, результатом взаємодії автомобіля з іншими учасниками руху. Впродовж багатьох років існували різні підходи до моделювання для вирішення цієї проблеми. В цілому, імітацію транспортного потоку з метою розв'язання основних проблем його розвитку поділяють на три умовні рівні: макрорівень, мезорівень, мікрорівень [226]. Моделі макрорівня описують весь транспортний потік як єдине ціле, з огляду на сукупність усіх АТЗ. Значущою характеристикою цієї моделі виступає інтенсивність руху. Цей тип моделі найбільш доцільно застосовувати при аналізі транспортної системи великого розміру, наприклад, магістральних і міжрегіональних транспортних мереж. Якщо йдеться про оцінювання конкретного параметру, то макромоделі є непридатними для цього через завищену похибку [228].

У роботі [226] також розглянуто теоретичні підходи щодо класифікації швидкості руху, її взаємозв'язок з іншими первинними показниками транспортного потоку, а також чинники, які впливають на швидкісні режими окремих АТЗ у транспортному потоці. Особливу увагу присвячено дослідженням миттєвих швидкостей на прямолінійних ділянках вулично-дорожньої мережі, як однієї з основних ознак, які характеризують умови безпеки руху.

Активізація досліджень транспортних потоків може відбутись, якщо чітко описати вплив кожного конкретного АТЗ на увесь транспортний потік [227, 228]. Одним із способів усунення людських помилок і затримок у веденому АТЗ є заміна водія водія сенсорами і відповідною комп'ютерною системою керування. Тому останнім часом з'являються праці, метою яких є розробка автономних систем інтелектуального круїз-контролю (AICCS) для автоматичного керування автомобілем, вивчення їх впливу на транспортний потік і порівняння його продуктивності з типом моделей водіїв людини [229, 230]. Недоліки більшості таких система є те, що вони не обмінюються інформацією з іншими АТЗ і не співпрацюють з іншими системами. Виявлено, що продуктивність системи AICCS є вищою, ніж у моделей поведінки водіїв. Комп'ютерне моделювання використовується для вивчення продуктивності запропонованої AICCS та аналіз наступних АТЗ в одній смузі, без проходження, під ручним і автоматичним управлінням. Крім того, було змодельовано декілька надзвичайних ситуацій, які включають аварійні зупинки та випадки вимкнення приводу. Результати моделювання демонструють ефективність AICCS та її потенційно сприятливий вплив на транспортний потік [234].

Великі зусилля були зроблені, як на національному, так і на міжнародному рівні, при дослідженні моделей прогнозування швидкості [231]. На відміну від попередніх досліджень, для вимірювання швидкості тепер застосовують супутникові навігаційні системи GPS, які дають достатньо позитивний результат у вимірюванні швидкостей і нагромадженні даних [230, 232-238].

Основний вплив на зміну умов та безпеки руху мають дорожні умови, інтенсивність і склад потоку. Візуальне спостереження зараз практично не використовується в дослідженнях [229]. Причому, саме ці показники формують характер інформаційного завантаження водія. Інформаційні показники поля сприйняття водія тісно пов'язані між собою. У багатьох наукових працях також вказується, що відносна швидкість руху інших учасників потоку відіграє велику роль в інформаційному забезпеченні водія. Рівень психічної

напруги водія при сприйнятті інформації залежить від двох факторів: цінності і кількості інформації. Кількість інформації залежить в основному від швидкості й інтенсивності руху. Найбільш цінною інформацією є та, котра в більшому ступеню впливає на прийняття водієм рішень, зв'язаних із забезпеченням безпеки руху [232]. Дослідження показало, що дані GPS, що передаються за допомогою стільникових технологій з АТЗ, можуть забезпечити більшу частину інформації про продуктивність об'єкта, яку бажають дорожні агентства. Однак отримання достатньої кількості цих даних економічно ефективним способом є важко [233, 235].

Джерелом даних для побудови ІТС, над якими ведуться дослідження, є розгалужена система спостереження та контролю автостради [234]. Вихідні дані кожного з ІТС-пристроїв, проаналізованих у цьому дослідженні, представили різні зображення (варіанти) виконання вантажних потоків для однієї і тієї ж ділянки дороги. В цілому, дослідження виявило, що інтеграція даних з усього спектру можливих пристроїв, які об'єднуються в ІТС, потенційно потребує як більш повного, так і більш точного загальний опису вантажних і транспортних потоків.

У сучасних дослідженнях швидкість залишається одним з основних параметрів дорожнього руху [239]. Оцінка ступеня зручності поїздки на АТЗ пов'язана зі швидкістю руху, або з оберненою до нею величиною – тривалістю їздки. Окрім того, забезпечення певних швидкісних режимів впливає на продуктивність роботи вантажного та пасажирського транспорту зокрема та ефективність функціонування транспортної системи загалом. Швидкість пов'язана з економічністю, безпекою та якістю обслуговування. Швидкість руху окремих автомобілів та швидкісні параметри усього транспортного потоку залежать від інтенсивності руху, дорожньо-планувальних чинників, кліматичних умов, психофізіологічних особливостей водія тощо. За можливості водії рухаються зі швидкостями, які, на їх думку, є найбільш оптимальними для даного виду поїздки. Суб'єктивний чинник приводить до того, що поняття «бажана швидкість» стало занадто розмитим, щоб його можна було описа-

ти на основі техніко-організаційних факторів. В реальних потоках розподіл швидкостей є досить значним і залежить від їх щільності. Оскільки тут однорідність транспортного потоку практично не досягається та й досягти однакової величини швидкості досить важко навіть для однакових за типом АТЗ. Тому звідси і виникає складність в розробленні таких схем організації руху та засобів її регулювання, які б задовольняли абсолютну більшість учасників руху. Проте, наблизитись до розв'язання цієї проблеми можна завдяки постійному моніторингу швидкісних режимів і вивченню чинників, які значною мірою їх визначають.

Оптимальна програма руху вздовж горизонтальної, прямолінійної магістралі може складатися з множини таких циклів, від чого програма руху буде нерівномірною – коливною. Для того, щоб вибрати параметри цієї програми, потрібно виконати прогнозування очікуваних дорожніх умов. Згідно з моделлю, яка викладена в роботі [240] для цього достатньо обчислити відносні величини $u(t), f_o, f_w$, які стосуються руху інших автомобілів по тій самій дорозі з незначним випередженням часу. Це спрощує реалізацію системи автоматизованого керування дорожнім рухом, оскільки позбавляє необхідності вимірювати фізичні величини, такі як абсолютні коефіцієнти дорожнього опору, вітрового опору, крутний момент на ведучих колесах, які на даний час не мають належного метрологічного забезпечення. Для реалізації режимів потрібно вимірювання прискорень та крутних моментів на провідних колесах.

В працях окремих дослідників оптимальні за складом режимів програми руху визначались за критерієм мінімуму енерговитрат [236, 241, 242]. Вважалося, що найбільш ощадними є такі транспортні цикли, в яких тривалість режиму руху автомобіля з постійною швидкістю та інтенсивність гальмування є максимальними [243]. При цьому структура оптимального циклу залежить від середньої швидкості і довжини шляху, пройденого автомобілем під час циклу. Рух автомобіля розглядався в заданих дорожніх умовах, без врахування параметрів транспортного потоку, як матеріальної точки і сформулювана задача – пошук оптимального закону керування двома змінними: рушійної

сили на ведучих колесах, зусилля гальмування. Таким чином, до уваги було взято наперед відомі неефективні режими примусового гальмування [244].

Опір дорожньому рухові намагались вимірювати багато вчених. При цьому ставилась різна мета: змоделювати динаміку автомобіля, оцінити якість шин чи властивості ходової частини АТЗ тощо. Загалом, усі дослідження доводять, що опір коченню, – один із складників опору руху – величина, що залежить від великої кількості чинників, тому для її дослідження слід застосувати емпіричні залежності, оскільки аналітичні в цьому випадку є не цілком адекватними. Були спроби спрогнозувати складний дорожній профіль, будуючи його числову характеристику – часовий ряд на основі апостеріорної оцінки роботи підвіски. Прогнозування відбувається у вигляді усіченої матриці параметрів, що представляє собою, так зване, «ковзне вікно» [237]. Проте застосування запропонованого алгоритму є вузьким за колом задач – стосується керування підвіскою і не може стосуватись оцінювання опору кочення АТЗ.

Таким чином, побудова розкладу руху автомобіля або автопоїзда, який би забезпечував мінімальні витрати енергії на усьому маршруті вздовж міжміських магістралей, з дотриманням принципу виконання транспортного завдання "саме вчасно", що може відбуватися за рахунок визначення дорожніх і транспортних умов є задачею, якій до цього часу приділялось мало уваги. Тому потрібно сформулювати умови й отримати нетривіальні розв’язки задачі оптимального керування автопоїздом при відомих з достатньою точністю дорожніх умовах, які б дали можливість синтезувати оптимальний розклад руху вздовж магістралі, що характеризується великою мінливістю умов.

1.3 Аналіз моделей і методів дослідження

1.3.1 Моделювання транспортних потоків. Дослідження і моделювання транспортного потоку проводиться вже понад сто років. Створено чимало макро- і мікромоделей, які до недавна ще давали задовільні розв’язки задач керування транспортними потоками. Але тепер дослідники стверджують, що

якісно змінився підхід до їх формулювання і розв'язання [189-270]. Ставиться під сумнів адекватність моделей транспортних потоків, особливо тих, які побудовані за аналогією з іншими потоками (гідравлічними, газів тощо) [236]. Деяку інформативність ще мають моделі й відповідні методи дослідження, що базуються на макромоделях, виведених з мікромоделей, або на імітаційному моделюванні ТП [271-279]. Проте, жодну з них не можна використати в повній мірі для того, щоб запобігти затримкам збільшенню тривалості доставки вантажів – з одного боку і відхиленням від оптимальних режимів руху – з іншого. Таку можливість мають методи оперативного керування АТЗ на основі моделювання в режимі реального часу. У роботі [278] проаналізовано переваги й недоліки існуючих методів моделювання ТС. Аналогічний огляд, але стосовно залізничних ТС зроблено в роботі [275]. Одним з найбільш поширених методів моделювання руху матеріальних потоків на МТМ є теорія масового обслуговування, що розглядає середовище, в якому існують матеріальні потоки як СМО [276, 277]. Однак теорія СМО не може бути ефективно застосована в умовах нестаціонарності та неординарності потоків, тобто відсутності їх ознак найпростішого потоку.

Особливо продуктивними виявляються поєднання в одному дослідницькому процесі таких теоретичних засобів як імітаційне моделювання та теорія кліткових автоматів. В окремих публікаціях є спроби застосувати до імітаційного моделювання ТС апарат мереж Петрі, або їх модифікацій [278-281]. Основний недолік цих моделей – відсутність їх часового впорядкування [170]. Крім того, синхронізація двох, або декількох часткових процесів приведена тут до такого рівня, коли різні елементи процесу виконуються з незмінним зміщенням в часі, або й одночасно, що на практиці далеко від істини. Тому для автомобільних магістральних перевезень такі мережі є неадекватними.

Короткострокове прогнозування трафіку було невід'ємною частиною більшості досліджень від початку 1980-х років. Найбільше зусиль було спрямовано на розробку методологій, які можуть бути використані для моделю-

вання характеристик трафіку та передбачення дорожніх умов руху АТЗ. В дослідженнях використовувались, переважно, універсальні математичні моделі [282]. Зростання вимог до системи керування транспортними потоками показало непридатність таких моделей. Розвиток технологій обробки сигналів та широке використання потужних комп'ютерів та нових математичних методів дають змогу дослідникам розширити кругозір та спрямувати роботу в складніших задачах сучасності. У статті [283] вказується, що для високої ефективності управління трафіком потрібен контроль середньої швидкості й щільності потоку для великого просторового і часового охоплення. Нажаль, на даний час поле середньої швидкості потоку оцінюють гармонічним середнім значенням на основі вибіркових точкових вимірювань. Це не забезпечує необхідної точності прогнозування. Оцінка щільності повинна враховувати динаміку стану потоку в часі й просторі. Це означає, що слід використовувати модельний підхід. На основі моделі потоку треба брати до уваги оновлену інформацію на фіксованих стадіях транспортного циклу та інформацію з зондуючих АТЗ. У дослідженні [284] було виконано огляд методів, засобів і відповідних аналітичних моделей для короткотермінового прогнозування швидкості АТЗ. Головною проблемою використання переважної більшості відомих моделей було названо велику варіативність потоку вхідних даних. Було вказано, що прогнозування на основі модельно-орієнтованого програмування поступається в ефективності, у порівнянні з програмуванням на основі даних. Однак, в якості вхідних величин пропонується застосовувати стандарні статистичні оцінки потоку, обчислені за фіксований проміжок часу. Таке он-лайн прогнозування є суперечним. Адже статистична оцінка є тим точнішою, чим більшого об'єму даних вона стосується. З іншого боку, чим більший період збору даних, тим менше часу залишається на вироблення і прийняття управлінських рішень. Також у статті не обґрунтовано вибору горизонту прогнозування.

Переваги технології транспортних засобів, які взаємодіють (Connected Vehicles (CV)) є загально визнаними на даний час [284, 108, 109]. CV пред-

ставляють комунікацію, так звану «транспортний засіб-інфраструктура» (V2I), яка включає покращену безпеку, підвищену екологічну стійкість, підвищення мобільності тощо. Однак ці технології є ще не готовими для впровадження, бо потребують чималі інвестиції. В статті [284] показано, що інвестиції та менеджмент, необхідні для досягнення потенціалу технологій CV, відстають. Поки що більш реальною вважається технологія комунікації «транспортний засіб-транспортний засіб» (Vehicle-toVehicle (V2V)). Хоча автовиробники починають витрачати ресурси на технологію V2V, вони, очевидно, не хочуть залежати від державних установ. Нинішня транспортна інфраструктура, у тому числі міжнародні транспортні коридори, не готові взаємодіяти з підключеними АТЗ. Інвестицій на державному та місцевому рівнях бракує навіть в таких розвинених країнах, як США [109, 284].

1.3.2. Моделі МТМ і маршрутизація. Існує декілька підходів до застосування алгоритмів нелінійної комбінаторної оптимізації при маршрутизації АТЗ. Основні класифікаційні ознаки – точність, тип простору розв’язків, структура обчислювальної схеми тощо [142, 145]. 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 [197]. 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 поділити на прості алгоритми, гібридні алгоритми, метаевристики, гібридні метаевристики, гіперевристики [146]. Однак, ці методи не відпові-

дають вимогам досліджень, пов’язаних з оперативним керуванням ТП на МТМ, оскільки потребують дуже великих об’ємів даних.

У багатьох роботах, де розглядається проблема динамічної маршрутизації АТЗ, часто пропонується стратегія отримання розв'язків, заснована на парадигмі системи «мурашиних колоній». Такий метод був протестований на наборі даних. Результати обчислень підтверджують ефективність та ефективність запропонованої стратегії [201]. Однак, метод «мурашиних колоній» є недостатньо ефективним, коли йдеться про його оперативне застосування з потоком вхідних даних, які часто змінюються.

У чималій кількості робіт, зокрема в працях Franklin T. Hanshar·Beatrice, M. Ombuki-Berman [202] представлена методологія генетичного алгоритму для розв'язування динамічної задачі маршрутизації транспортних засобів. Ефективність запропонованого алгоритму позитивно оцінюється в літературі. У порівнянні з еврістичним підходом, генетичні алгоритми краще виконують функції мінімізацію витрат на їздки. Однак, використання генетичних алгоритмів потребує великого обсягу навчальних даних і їх застосування стримується необхідністю тренувальних циклів. З поняттям оперативності досліджень це поки що не сумісно.

Огляд відомих публікацій показує перевагу адаптивних методів для динамічної маршрутизації у порівнянні з неадаптивними. Адаптивні методи базуються на тому, що кожен наступний крок моделювання залежить від поточних параметрів вхідного потоку даних. Якщо потік вхідних даних є попередньо обробленим, то такий підхід до прийняття рішень дає середнє поліпшення 0-5% розв’язку. Однак, такі підходи поки що не знайшли широкого застосуванні в керуванні процесами транспортування на МТМ [199]. Враховуючи виконаний огляд, можна стверджувати, що адаптація вхідних даних і групування їх є кращим напрямком у вдосконаленні алгоритму динамічної оптимізації ТП, зокрема динамічної маршрутизації парку транспортних засобів і може забезпечити вищу якість розв’язку.

1.3.3 Моделі транспортних процесів. Для дослідження транспортного

процесу його розглядають як дискретний і циклічний [190, 285]. Використовують декомпозицію загального матеріального потоку на вантажопотоки і автомобілепотоки. Найбільшої ефективності він досягне тоді, коли ці потоки будуть взаємоузгодженими. Але таку задачу розв'язують поетапно, використовуючи методи динамічного програмування. В окремих випадках отримання оптимального розв'язку не гарантується.

В інших галузях, зокрема в технічному сервісі машин, відомі методи структурної оптимізації технологічних процесів. Встановлено, що їх показники ефективності залежать від організаційного параметра – такту, під яким розуміють час між переміщенням предмета праці на чергову технологічну позицію [208, 286, 287]. Процеси доставки поштучних тарних вантажів мають подібний організаційний зміст. Описану методику можна до них застосувати, якщо врахувати їх особливості. По-перше, організаційний параметр – такт для транспортних процесів, на відміну від ремонтно-обслуговчих, є змінною величиною, що випливає з гуртового характеру перевезень. По-друге, розгалуження в ТТС зумовлені не будовою об'єктів перевезення, а розгалуженою МТМ і вантажомісткістю АТЗ.

Стрункості математичного формулювання і нових способів розв'язання методологія впорядкування проектів (у вужчому розумінні – технологічних процесів деякої ТС) набула в задачах, які базуються на мережному плануванні з використанням оргграфів [111]. Однак, ця методологія не може бути використана для сформульованої нами проблеми через деякі відмінності. Зокрема, традиційно вважалося, що у проекті є один напрям матеріального потоку (МП) – від початкової вершини – до кінцевої (як правило – фіктивні операції). Якщо йдеться про два МП, що взаємодіють, наприклад, автомобіле- і вантажопотік, то чіткого їх напряму не існує. Потрібно дослідити, як такт впливає на структуру системи. Такі терміни як фронт робіт, тривалість циклу, технологічна позиція та інші, що мали місце в працях [286, 287], мають набути іншого змісту, або ж взагалі не вживатись. Деякі терміни використані в такому загальному змісті, що не можуть бути ефективно використані для

конкретної мети досліджень.

Для підготовки бази даних для процесу прогнозування швидкості дослідниками використовується методика аналізу часових рядів транспортних завдань з ковзними вікнами (SWTS) [239]. Найбільшу продуктивність побудови прогнозів має, за оцінками дослідників, еволюційна машина екстремального навчання (E-LLM). Завдяки вичерпному порівняльному дослідженню деякі автори зауважили, що E-LLM є потужним інструментом для прогнозування профілів швидкості АТЗ. Результати поточного дослідження можуть бути корисними для розробки ефективних інтелектуальних контролерів силових агрегатів АТЗ [288].

Кліткові автомати є надзвичайно спрощеним методологічним підходом для моделювання складних ТП, де швидкість роботи є більш важливою, ніж точність моделі. У клітковому автоматі простір і час поділяються на дискретні клітини і кроки. Обмін клітин здійснюється тільки транспортованими одиницями з сусідніми клітинами безпосередньо протягом одного етапу часу. Модель кліткового автомату визначається правилами, які контролюють ці обміни. У статті [240] описано абсолютно нову концепцію принципу кліткового автомата для моделювання транспортного потоку. Ця модель відповідає реальній поведінці водія більш точно, ніж модель від Нагеля і Шрекенберга. Зберігаються властивості дискретного часу та простору. Також процес оновлення може бути виконаний незалежно для кожного АТЗ. Ця модель досягає досить гарної відповідності спостережуваному реальному транспортному потоку. Ступінь відповідності з реальністю залежить від застосовуваної моделі автомобіля. Нова концепція моделі поєднує в собі реалістичне моделювання з швидкою обчислювальною продуктивністю. Моделі транспортних потоків на МТМ, засновані на кліткових автоматах, є ефективні через їх простоту і їх здатності легко реалізуватися для паралельних обчислень. Інші мікроскопічні моделі, такі як моделі автомобілів, що слідують за лідером (ним виступає комп'ютер), є більш дорогими, але вони більш реалістично відображають поведінку водія та детальні характеристики автомобіля [271]. У роботі [289]

пропонується гібрид цих двох категорій, що визначає модель трафіку на основі безперервних клітинних автоматів.

1.3.4 Моделювання транспортних систем. Для аналізу й синтезу ефективної ТС застосовують методи, які можна поділити на дві групи. Перша – це прості у використанні, які, однак, недостатньо повно описують структуру і технологію ТП [276]. Друга група – методи, які дають добру уяву про структуру і технологію, але складні в застосуванні на практиці, потребують значного масиву первинних даних та експертних оцінок [166]. Загальним недоліком існуючих методів розрахунку є велика трудомісткість їх побудови, витрати часу і, як наслідок, – низька оперативність отримання результатів. Тому в сучасних умовах очевидна необхідність створення нових типів моделей. При цьому, об’єкт дослідження варто розглядати не тільки як сукупність декількох СМО, але і як єдину ТС, робота якої повинна задовольняти вимогам найширшого кола споживачів. Зазначені особливості ТС дають можливість використовувати методи теорії автоматичного управління і регулювання для створення системи, яка автоматизує процес прийняття рішень. Це стало одним з перспективним напрямків у дослідженні організаційних систем [235]. Однак, для його застосування потрібна конкретизація проблеми, що вирішується на основі ідентифікації класу об’єкта дослідження – визначення структурних властивостей та динаміки ТС.

Існує багато різних універсальних систем імітаційного моделювання транспортних систем на розподілених мережах. Серед них такі системи, як AIMSUN, PA-RAMICS, AUTOBAHN, IHSDM, INTEGRATION, PLANSIM-T, FLEXSYT-II, TRANSIMS, SimTraffic 6, VISSIM, MITSIM та інш. [272, 235]. Авторами статті [290] зроблено огляд систем імітаційного моделювання (ІМ) і доведена необхідність розробки моделей ТС як розподіленої системи. Така ІМ дозволяє відображати транспортні мережі великих міст з великою кількістю автомобілів, а також скоротити фінансові витрати на забезпечення роботи системи. В системі існує можливість моделювання вибору маршруту водієм до початку і під час поїздки [291]. Найбільш досконалою вважають комп'ю-

терну систему AIMSUN. В [290] відмічено, що моделі поведінки АТЗ в системі AIMSUN визначаються функціями від декількох параметрів, що дозволяє моделювати рух різних типів АТЗ (автомобілів, автобусів, вантажівок і т.д.), які потім можуть бути об'єднані в класи. Спільними недоліками усіх систем є обмеженість обчислювальних ресурсів, коли йдеться про великі МТМ, а також залежність точності опису потоків від великої кількості випадкових факторів. Зрештою, не усі названі програмні засоби мають зв'язок з он-лайн потоком даних, а також у них не передбачено розвиток ІТС. Також, не менш вагомим недоліком є те, що усі програмні засоби, через методики, які у них закладені, не можуть відобразити прискорення і сповільнення окремих суб'єктів транспортного потоку. Через це багато маневрів, які відтворюються системами, є мало реалістичними.

Підсумовуючи опубліковані методи, можна стверджувати, що на даний час відомі лише загальні принципи формування системи прийняття рішень в організації процесів перевезення вантажів на МТМ. Проте, через необґрунтованість об'єктивно необхідних кількості, моментів і місця надходження оперативної інформації, відсутність процесів формування її потоків та їх узгодження з МП, такі рішення нерідко доводиться приймати в умовах невизначеності, або неповної визначеності, що применшує їх ефективність.

1.4 Обґрунтування критеріїв організації та розвитку процесів магістральних вантажних перевезень

Транспортні процеси організовують, переважно, за критерієм сумарних грошових витрат на одну тонну перевезеного вантажу, які залежать від вантажності, середньої технічної швидкості та рівня завантаженості АТЗ – з одного боку, тривалості підготовчих, навантажувально-розвантажувальних операцій – з іншого. Розглядаючи залежності цього параметра від довжини їздки з вантажем, виробляють рішення стосовно доцільності схем з перевантаженням, вибору АТЗ за вантажністю [162]. Така методика може використовуватись для простих збутових мереж, а також тоді, коли зміна розміру гурту

вантажів в логістичному ланцюгу не передбачається.

На даний час перевізники та автомобільно-дорожні служби використовують у прийнятті рішень такі критерії:

- мінімум витрат коштів;
- максимальний прибуток від виконання перевезень;
- максимальна швидкість доставки вантажів;
- максимальна пропускна здатність каналу доставки.

Проаналізувавши їх детально, наведемо такі висновки.

Перший та другий критерій забезпечують очікування перевізників, якщо вдало складається ринкова ситуація. Таким чином, вони відображають, переважно, кон'юнктуру ринку. Для оцінки глобального розвитку автомобільних транспортних систем їх використовувати недоцільно.

Мінімальні витрати часу доставки до цього часу використовують як основний критерій, оскільки вони відображають технологічний бік питання – характеризують продуктивність АТЗ. Проте, неузгодженість різних ланок логістичних ланцюгів вносить до цього показника досить широкі межі варіації.

Збільшення пропускної здатності окремих доріг, місткості складів, кількості постів навантаження і розвантаження не обов'язково призведе до розв'язання „вузьких місць" МТМ і збільшення її пропускної спроможності в цілому. Адже тут потрібно враховувати, які процеси у цій системі діють, як взаємодіють АТЗ та інші допоміжні засоби інфраструктури. Розвиток ТП на МТМ – це їх пристосування до умов матеріального виробництва і споживання, які утворюють дискретні матеріальні потоки. Операції з перетворень вантажопотоків і автомобілепотоків у цих процесах можуть відбуватися у фіксовані інтервали часу. ЛЛ таких операцій є, переважно, взаємопов'язаними. Різна за величиною тривалість операцій та їх випадковий характер зумовлюють наявність непродуктивних станів елементів ТП. Отже, існують такі послідовності операцій, при яких сумарна кількість таких небажаних станів буде мінімальною. У цьому випадку мова йде про певну впорядкованість ТП. Засто-

сування відповідної методики дасть змогу знайти граничні стани ТП, при яких задіяні в ньому АТЗ використовуються максимально ефективно. При цьому більшість операцій граничного стану виконуються „саме вчасно” – без затримок. Час завершення будь-якої операції ТП диктує інша, яка з нею пов’язана. Тому їх узгодження (впорядкування) – це компроміс, який передбачає виконання операцій у заздалегідь неоптимальному режимі. Проте, при застосуванні критерію „саме вчасно” досягається мінімум резерву:

1) енергетичних ресурсів;

2) об’єктів перевезення (вантажів, транспортних пакетів, контейнерів);

3) провізних здатностей парків АТЗ;

4) часу для виконання доставки виробів та сировини [292-294].

Якщо розглядати рух автомобіля вздовж магістралі без нагромадження запасу енергії, що відповідає найбільш ощадному за витратою палива, оскільки не використовується примусове гальмування, а необхідне сповільнення досягається за рахунок дії природних сил опору руху [295]. Таким чином, програму руху вантажного автомобіля можна спланувати так, що він не розвиватиме максимально можливої технічної швидкість в даних дорожніх і транспортних умовах, а рухатиметься за графіком „саме вчасно” на ощадному режимі.

Відомо, що перевезення вантажів великим гуртом на міжміських маршрутах знижує питому собівартість такої операції. Виявлено що залежність собівартості перевезень від розміру гурту вантажів та від такту дискретного МП не є монотонно зростаючою [37]. Вона складається з неперервних ділянок, кожна з яких має локальний оптимум, що відповідає граничним параметрам однієї ТС (рис. 1.4). Операції в таких ТС є впорядкованими так, що кількість споживчих пакетів в одному гурті відправки, а також у транспортному пакеті є мінімальною для заданої інтенсивності їх доставки кінцевому споживачеві. Тому й такий показник, як гарантована тривалість доставки пакетів споживачеві для цих схем є також мінімальним (рис. 1.5).

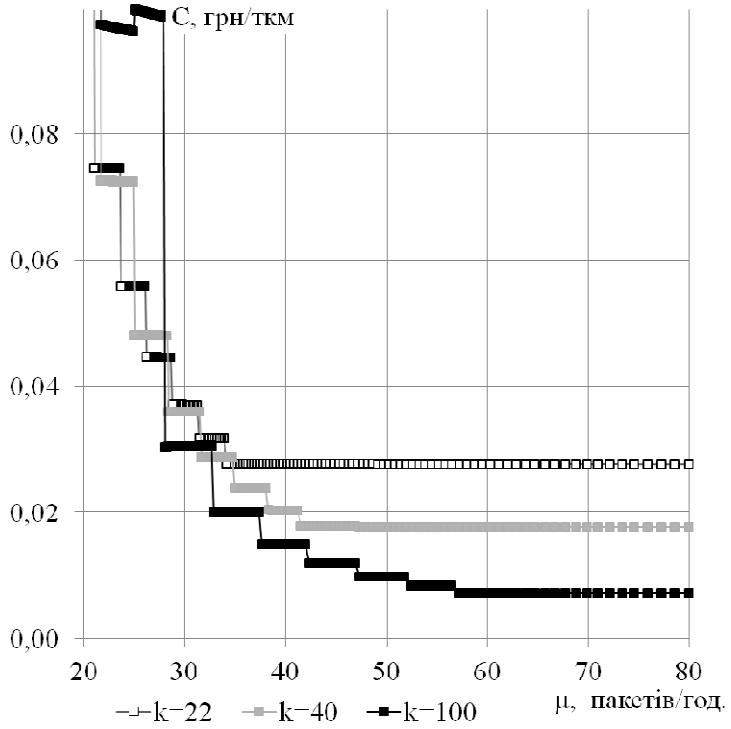


Рисунок 1.4 – Залежність собівартості перевезення від інтенсивності дискретного потоку μ і розміру гурту відправки транспортних пакетів *k*

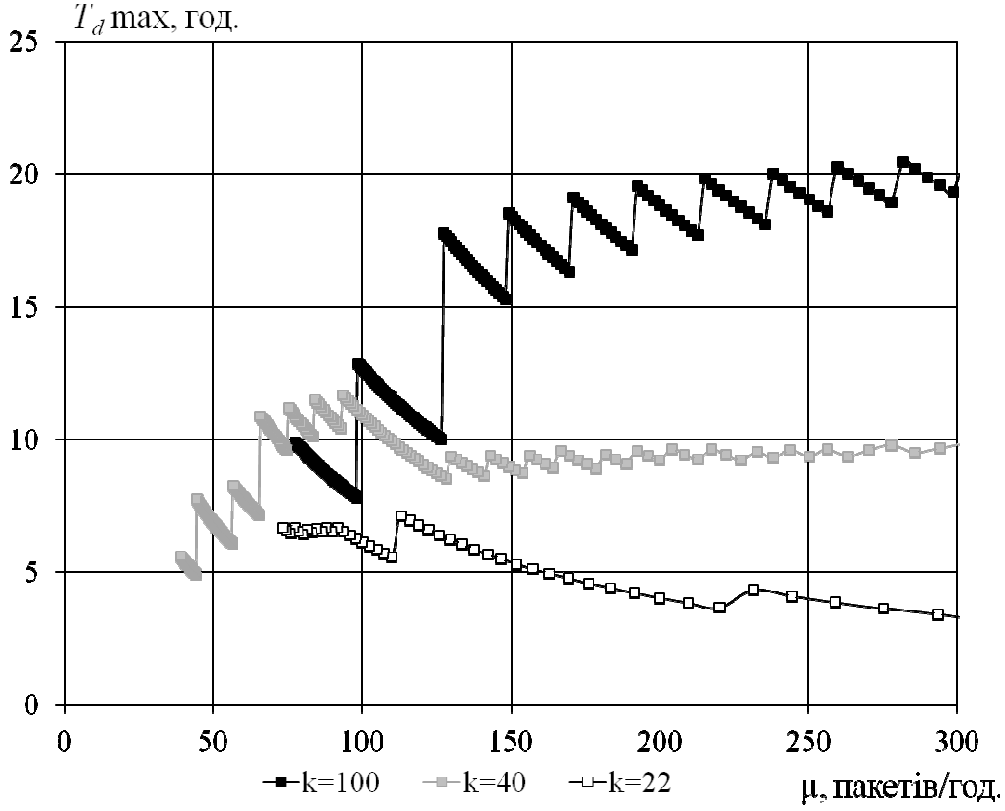


Рисунок 1.5 – Залежність максимальної гарантованої тривалості доставки вантажів від інтенсивності дискретного потоку μ і розміру гурту відправки транспортних пакетів *k*

Таким чином, критерій розвитку ТП «саме вчасно» дає змогу впорядкувати ТП, отримуючи при цьому заощадження енергетичних ресурсів, підвищення продуктивності АТЗ, та зниження затримок доставки дрібних відправок.

1.5 Структурно-логічна схема досліджень

З аналізу сучасного стану і динаміки розвитку міжміських вантажних автомобільних перевезень сформулюємо проблемні аспекти, які супроводжують розвиток систем керування транспортних процесів на МТМ:

- зростає кількість АТП, а швидшими темпами – кількість АТЗ у них;
- непропорційно кількості рухомого складу зростають простої АТЗ по усіх категоріях (в заторах, в чергах до навантаження-розвантаження, міжзмінні, організаційні тощо);
- збільшуються затримки доставки вантажів, знижується швидкість доставки, спостерігається втрата і псування вантажів;
- частішають випадки перевантаження транспортних засобів понад дозволені норми навантаження на осі;
- загострюється проблема браку водіїв.

Такі аспекти зумовлені єдиною проблемою, яка загострюється в сучасних МТМ і унеможливлює впровадження нових технологій, зокрема інтелектуальних систем контролю: інформація в сучасних ТП, які стають складнішими за структурою, недовикористовується. У зв’язку з цим застосовується надмірне резервування:

- провізної здатності парків АТЗ;
- часу на виконання кожного зокрема і сукупності взаємопов’язаних процесів;
- інтенсивності руху по магістралях;
- рівня завантаження автопоїздів;
- робочого часу водіїв та експедиторів.

Разом з тим, потрібно відмітити, що сучасні інформаційні технології розвиваються значно швидшими темпами, ніж транспортні, є доступними для перевізників, однак вони неуспішно запроваджуються в ТС. Свідченнями тому є:

- інформація про ретроспективний, поточний стан ТП, а також прогноз є доступною, однак розпорошеною між суб'єктами транспортних процесів; Наприклад, сайти посередників транспортно-логістичних послуг (Lardi-trans.com, Della.ua, ATI.com.ua та інші) подають часто інформацію, яка є неактуальною, недостовірною, дублюється тощо [87];
- обмін інформацією між суб'єктами ТП відбувається значно швидше, ніж середня тривалість виконання замовлення [293];
- повідомлення про перебіг транспортних процесів, особливо – про можливість зворотнього завантаженого пробігу автомобілів, надходять невчасно в потрібні місця [82].

З усього цього робимо загальний висновок про те, що інформація в магістральній ТС використовується неефективно. У зв'язку з цим сформулюємо таку ***робочу гіпотезу***. *Необхідний рівень резервування провізної здатності парків АТЗ, згідно із заданим рівнем швидкодії та надійності доставки вантажів, залежить від взаємодії суб'єктів транспортно-логістичних процесів, яка забезпечується відповідною організацією транспортного процесу.*

Розроблення системи моделей організації ТП на МТМ формується в схему дисертаційних досліджень (рис. 1.6).

Рисунок 1.6 – Схема дисертаційних досліджень

На основі закономірностей формування матеріальних та інформаційних потоків на магістральній транспортній мережі формуються теоретичні засади періодичної відтворюваності ТП, тобто формування транспортних циклів. Як відомо, циклічний характер процесів зумовлює більш ефективне використання інформації, повнота та достовірність якої збільшуються з кожним циклом [180].

Нагромадження інформації призводить до поступового наближення до ідеального розуміння процесів. З іншого боку, завдяки циклічності і неперервності процесів їх координація в часі є задачею з меншим ступенем невизначеності [189]. Тому, на основі дослідження циклічності ТП формується теорія розв’язання задач, які раніше відносились до NP-складних у сильному

сенсі: складання унітарних статичних та динамічних розкладів, розв'язання задач мультикомівояжера, та інших задач маршрутизації [170]. До них раніше застосовували наближені евристичні методи, які мали невелику розмірність.

Задачі контролю режимів руху АТЗ та роботи і відпочинку водіїв магістральних автопоїздів є на сьогоднішній день нелінійними з великою кількістю змінних. Застосування циклічного підходу до них усуває цей недолік. Тому виконаний аналіз дає змогу зробити наступні висновки по огляду стану проблеми і сформулювати обсяг дисертаційних досліджень.

1.6 Висновки за розділом 1

В цілому, зроблений аналітичний огляд наукових праць стосовно теми дисертаційної роботи дозволив виявити такі особливості сучасної теорії організації магістральними транспортними процесами.

1. Структура ланцюгів доставки вантажів не розглядалась раніше як сукупність елементарних матеріальних, енергетичних та інформаційних перетворень, які взаємодіють. Через це не були виявлені закономірності таких перетворень. Відсутні такі ж відображення у теорії квазі, або детермінованих циклів.
2. Якісні зміни в ТП відбуваються в дискретні моменти часу, які залежать від динаміки матеріальних потоків, тому саме стосовно цих властивостей потрібно розглядати зародження необхідної інформації. В кожному з цих моментів існує об'єктивно необхідний обсяг інформації.
3. Під час організації вантажних перевезень на МТМ, зокрема в ІТС, часто використовується надлишковість інформації як засіб діагностування, самодіагностування, верифікації. Для цього потрібні додаткові засоби. Проте, інформаційні потоки в ТП можуть по-різному взаємодіяти: взаємно підсилюватись, послаблюватись. Самодіагностиці може сприяти лише ефект підсилення інформаційних потоків.

4. Результати діагностування транспортного процесу використовуються не в повній мірі, тому будь-яка сучасна велика ТС на МТМ вважається обмежено контрольованою.
5. Критерієм якості оперативного керування транспортними потоками вважають чисельну міру відхилень фактичних значень контрольованих параметрів від оптимальної програми, яка складається за умови виконання кошторисних, енергетичних, ресурсних обмежень, що діють в межах прогнозованого часового інтервалу. На МТМ швидкість вважають головним параметром програми руху. Однак не береться до уваги, що фактична реалізована експлуатаційна швидкість – це результат взаємодії АТЗ з іншими об'єктами транспортного потоку, а при застосуванні ІТС 3-го і 4-го покоління – і з програмно-апаратними засобами дорожньої інфраструктури. Такі умови суттєво обмежують розвиток ТП. Тому подальші дослідження повинні бути скеровані на взаємодію АТЗ для підвищення ефективності прогнозування швидкості та ефективності використання здобутої оперативної інформації.
6. Для контролю АТЗ на магістральних міжміських дорогах розробляються «внутрішні» і «зовнішні» інформаційні системи. Одні зводять до мінімуму сумарні затримки автомобіля безвідносно до інших об'єктів дорожнього руху, інші – вирівнюють середні швидкості, регулюють режим руху тощо. Проте, останні розробки свідчать, що більш ефективно функціонують комбіновані системи. Справедливо відстоюється сучасна концепція «доцільної комунікабельності» автотранспортних засобів.
7. Традиційні методи моделювання транспортних потоків (макро- і мікромоделі) не дають змоги вирішити сучасні завдання, які стоять при організації ТП. Створити динамічну множину правил вибору режимів поведінки можна, використовуючи нові імітаційні моделі кліткових автоматів (КА), а також мультиагентний підхід. Для магістральних транспортних потоків вони є достатньо адекватними, оскільки характеризуються високою стійкістю при малих густинах транспортного потоку. Проте, КА мають той

недолік, що розглядають дискретно і час, і переміщення АТЗ, водночас приймаючи його як матеріальну точку, або ж як комірку. Тому потрібні нові модифікації таких моделей.

8. В дослідженнях транспортних потоків вибір режимів, загалом, приймається раціональним з міркувань безпеки руху, зменшення простоїв та затримок. Однак, давно відомо, що для певних дорожніх умов існує оптимальна програма розгону-руху-гальмування залежно від динамічних властивостей АТЗ, та довжини маршруту.
9. Сучасні телеметричні засоби досягли такого рівня, що в змозі надати відповідне інформаційне забезпечення для вибору найбільш раціональних в заданих транспортних умовах рішень. Проте, відсутність теоретичного обґрунтування унеможливлює їх ефективне використання в організації дорожнього руху.
10. В основі інформаційних технологій на автомобільному транспорті є бортові інформаційно-аналітичні комплекси, які отримують, обробляють і порівнюють інформацію у повідомленнях від різних джерел (у тому числі – від GPS). З такими розробками вдосконалюється лише процес аналізу стану транспортних комунікацій, що полегшує задачі маршрутизації. Проте, аналіз транспортних умов з допомогою таких комплексів не проводиться.
11. Аналітичний огляд існуючих систем організації і контролю за виконанням ТП показує переваги і недоліки як бортових та зовнішніх, автономних та неавтономних систем. Відомо, що найбільш ефективним є комбіноване управління рухом, яке використовує і централізовану АСУ рухом, і засоби космічної навігації і автономні бортові системи. На вищому щаблі розвитку є дослідження навігаційних систем в авіації, комп'ютерних мереж, які можна взяти за аналоги.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [1-60].

РОЗДІЛ 2
ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЦИКЛІВ

2.1 Закономірності вхідних матеріальних потоків на магістральній транспортній мережі

Найбільш успішне керування транспортними процесами може бути реалізоване при встановленні закономірностей виникнення і перетворення матеріальних потоків. Адже такі перетворення є джерелами виникнення інформаційних сигналів, та потребує додаткових енергетичних витрат [296, 297]. Дослідження енергетичних та інформаціних потоків на мікро та макрорівнях привертає чималу увагу науковців. Проте, найчастіше дослідження носять теоретичний характер. Практичне значення мають лише дослідження, які стосуються найпростіших стаціонарних потоків. Останніми роками глибокий теоретичний та практичний інтерес вчених привернули стохастичні потоки, в яких прослідковується циклічний характер процесів [298, 299]. Надходження замовлень на перевезення вантажів, які розглядають як джерела вантажопотоків, є також стохастичним процесом [300]. В більшості випадків виконання транспортних циклів у міжміському сполученні має стохастичний зміст. Тому одними з найпоширеніших інструментів дослідження матеріальних потоків в транспортних системах є методи теорії СМО. Так, можна назвати низку праць, де методи СМО застосовувались для дослідження логістичних ланцюгів, зокрема оптимальних підсистем диспетчеризації матеріальних потоків [189, 300, 301, 302]. Добре вивченими є ті процеси виникнення і обслуговування замовлень на перевезення, які володіють властивостями найпростіших стаціонарних Пуассонівських потоків [82, 277, 206, 303]. Однак, припущення про найпростіші потоки подій не справджується через декілька причин. По-перше, відсутня умова ординарності випадкових подій. Період формування заявок на перевезення у більшості підприємств становить один день. За цей час перевізник отримує декілька замовлень в одному і тому ж пункті відправлення, які надходять одночасно. По-друге, прибуття автомобілів в пункт ро-

звантаження є, часто, також неординарним процесом, оскільки автомобілі прибувають з різних маршрутів і розвантажуються, переважно, на різних терміналах. Інтенсивність виникнення замовлень, особливо на перевезення сезонних товарів та сільськогосподарської сировини і (продукції, деревини, будівельних матеріалів тощо) – змінна впродовж періоду планування. Тому й стаціонарність для міжміських перевезень не є характерною ознакою.

При дослідженні МТМ нами здійснено ІМ обслуговування потоку вхідних замовлень на перевезення сипких вантажів за трьома, найбільш поширеними стратегіями, які застосовують АТП: без порожнього пробігу з очікуванням у пункті прибуття, з порожнім пробігом до найближчого пункту завантаження; з порожнім пробігом до найближчого пункту завантаження і фіксованими періодами повторності наперед відомих замовлень [81]. Методика ІМ базується на абстрагуванні діяльності перевізника від впливу конкурентного середовища. Припускалось, що об’єкт моделі, один перевізник, – має виключне право вибору замовлень, серед тих, які надійшли в заданий період, якщо їх є достатньо. Відмова вантажовласнику надходить лише тоді, коли усі АТЗ вже розподілені на такі транспортні завдання, для яких кількість їздок з вантажем, середня тривалість однієї їздки з вантажем є більшими. У такому випадку експлуатаційні показники парку АТЗ будуть кращими. Враховано також те, що окремі міжміські перевезення вантажів потребують часу, який перевищує тривалість зміни водія/екіпажу одного автопоїзда. В такому випадку прийняте замовлення зменшує кількість доступних АТЗ на наступний цикл моделювання (плановий період). Таким чином, схема моделі: один перевізник – декілька замовників. Максимальна кількість замовників є обмеженою. Звідси кількість циклічних часових рядів вхідних потоків відповідає цій кількості. Серед перевезень вантажів трапляються багатоциклові, тобто такі, які потрібно здійснити декількома їздками. Їх можна виконати впродовж декількох змін послідовно одним АТЗ, або одночасно декількома вільними АТЗ. Це є модель транспортних циклів з дискретним часом. Найменша неподільна тривалість циклу – один робочий день. Завантаження АТЗ здійсню-

ється без перспективного плану на наступні періоди. Один і той ж АТЗ не можна використовувати на виконання двох різних замовлень одночасно, навіть якщо за тривалістю їх можна виконати за одну зміну. Блок-схема алгоритму ІМ, та коди комп'ютерної програми, яка виконує таке ІМ, подано, відповідно, в додатку А.

Головний параметр ІМ, а саме кількість відмов, разом із його похідними характеристиками показано на рис. 2.1 і 2.2. На кожній діаграмі відображено чотири часові ряди:

1) кількість замовлень, які надійшли у вигляді заявок на АТП – це найбільше числове значення серед усіх часових рядів й залежить воно тільки від генератора випадкових чисел;

2) кількість замовлень, які можна прийняти до виконання, яка є максимальною на початку моделювання; але коли АТЗ вже розподілені на маршрути, то їх кінцеві пункти, як правило, не співпадають з початковими пунктами нових замовлень, тому ця величина Z_a на наступних циклах коливається;

3) кількість відмов – це різниця між кількістю замовлень, які надійшли і тими, що прийняті до виконання на поточному кроці без врахування тих, які ще виконуються Z_a; оскільки АТП не може вплинути прямими методами на загальний обсяг замовлень, то потрібно розглядати методи організації маршрутів так, щоб вони були раціональними і враховували доступний прогноз вхідного потоку; кількість відмов на наступних, починаючи з j=1 кроку моделювання залежить ще й від обсягу робіт по виконанню замовлень на кроці $j-1$;

4) кількість замовлень, які виконуються, залежить від того, як був здійснений розподіл автомобілів в минулому і від кількості доступних замовлень в теперішній момент.

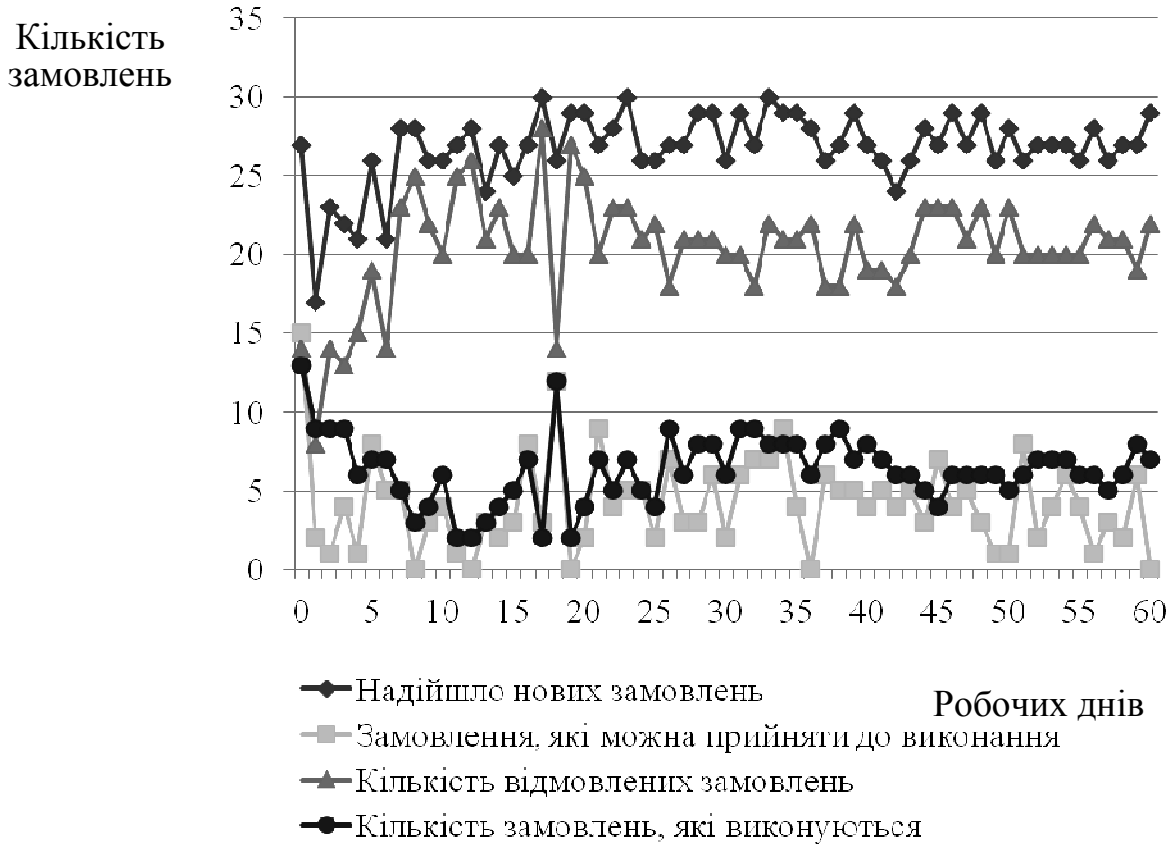


Рисунок 2.1 – Покрокова зміна вхідного потоку замовлень і його обслуговування при відсутності пробігу без вантажу, з очікуванням замовлення в пункті останнього розвантаження (1-а стратегія)

Якщо порожній пробіг для АТЗ заборонено (1-а стратегія), то розбіжність між кількістю замовлень, які надійшли і тих, які виконуються є дуже великою (див. рис. 2.1). Адже АТЗ обмежені у використанні навіть, якщо інформація про невиконані й доступні замовлення є в інших пунктах. Однак, до кінця останнього циклу кількість відмов і кількість замовлень, які виконуються для даної стратегії обслуговування стабілізуються, а їх часові ряди набувають стохастично-періодичного характеру [177].

Загальна кількість відмов при стратегії №2 дещо зменшується. Тут не можна говорити про покращення використання парку АТЗ. Адже навіть, якщо автомобіль виконає переїзд до сусіднього найближчого пункту, де розміщений вантаж для перевезення з попереднього невиконаного замовлення, то це ще не означає, що цей автомобіль буде використаний.

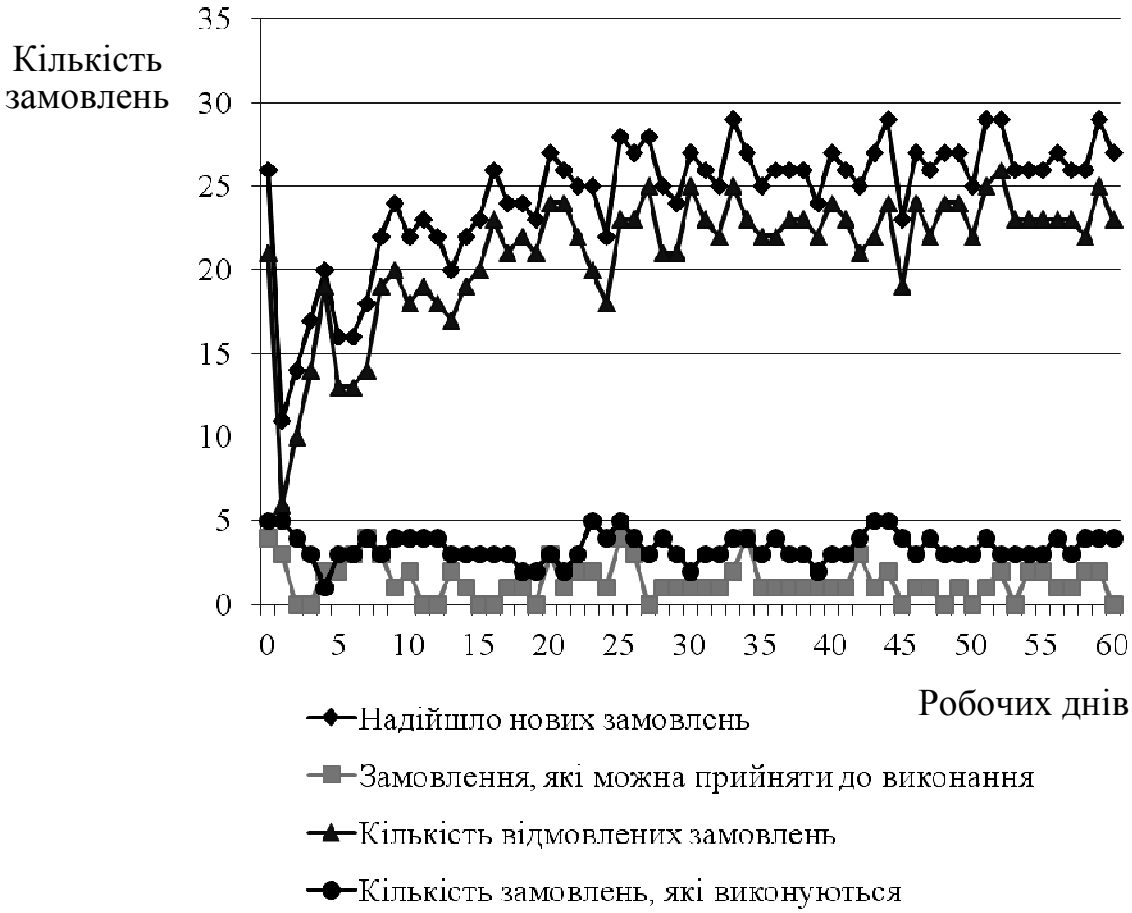


Рисунок 2.2 – Покрокова зміна вхідного потоку і його обслуговування з пробігом без вантажу, і без очікування чергового замовлення в пункті останнього розвантаження (2-а стратегія)

Такий самий пробіг можуть здійснити й інші автомобілі. Однак, при стратегії №2 кількість замовлень, які виконуються – це майже стаціонарний процес, який зазнає мало коливань. У зв'язку з тим, що кількість замовлень, які виконуються є, переважно, більшою, ніж кількість інших замовлень, які можна прийняти до виконання, можна зробити висновок, що стратегія №2 націлена на виконання великих (багато їздок з вантажем) і довгострокових (багато змін зайнятості автомобіля) замовлень. Вона приносить стабільність, але не знижує простої автомобілів одного парку. Кількість відмов зменшується, якщо використовувати доступні прогнозні дані стосовно періодичності надходження замовлень та їх різновидів. Наприклад, якщо періодичність надходження замовлень відома і вона не перевищує 12 діб, то вхідний потік

можна охарактеризувати приблизно сталою інтенсивністю. Однак, це не зменшує кількість відмовлених замовлень, хоча процес їх виконання стабілізується. Це відображають часові ряди стратегія №3 (рис. 2.3).

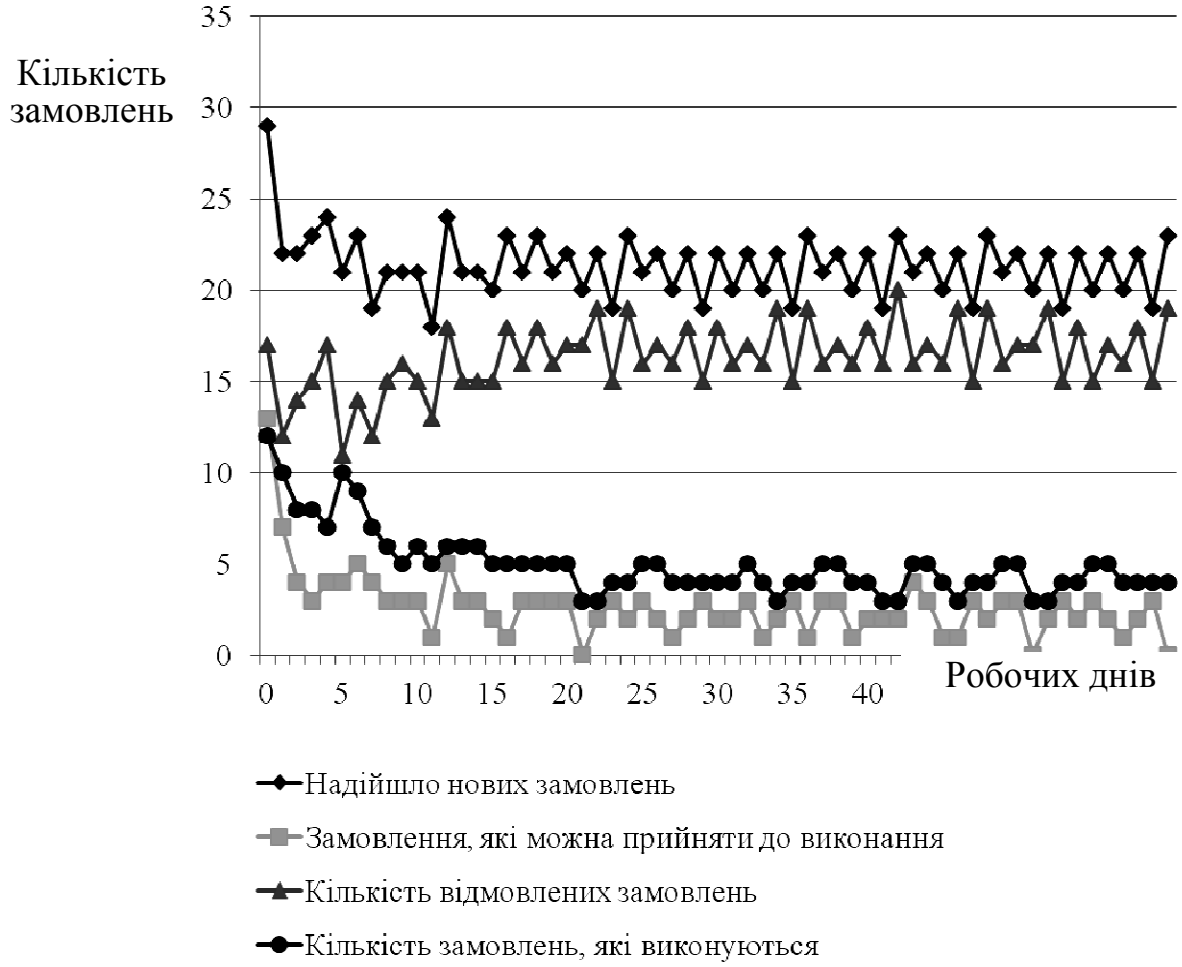


Рисунок 2.3 – Покрокова зміна вхідного потоку і його обслуговування з пробігом без вантажу, і без очікування чергового замовлення в пункті останнього розвантаження при фіксованій періодичності надходження замовлень (3-а стратегія)

Якщо порівняти сумарні і середні за цикл параметри імітаційної моделі, які налаштовані на кожну з трьох стратегій, то можна виділити (табл. 2.1) такі їх особливості. У таблиці 2.1 подано результати ІМ при фіксованому значенні максимальної (30 діб) і мінімальної (12 діб) періодичності виникнення замовлень.

Таблиця 2.1 – Зведені за 60 кроків показники імітаційного моделювання при трьох стратегіях обслуговування вхідного потоку замовлень на перевезення вантажів

Показник	Стратегія №1	Стратегія №2	Стратегія №3
Середня тривалість їздок з вантажем за цикл, год.	31,4	56,1	35,7
Сумарна тривалість їздок з вантажем за цикл, год.	1882,7	3368,8	2139,0
Середня тривалість простою транспорту за цикл, год.	253,3	228,5	249,0
Сумарна тривалість простою за цикл, год.	15197,3	13711,2	14940,8
Загальна кількість відмов	1512	1250	1132
Загальна кількість замовлень	1712	1735	1461
Середня тривалість пробігу автомобілів без вантажу за цикл, год.	0,0	41,8	1,02

Характерними особливостями відомих стратегій є:

- для стратегії №1 – відсутність порожнього пробігу, але найбільші кількість відмов і тривалість простою;

- для стратегії №2 – велика кількість поїздок з вантажем, однак для цього АТЗ мають здійснювати великі порожні пробіги, простої транспорту – найменші;

- для стратегії №3 – найменша кількість відмов, але й невелика тривалість пробігу з вантажем.

Для підтвердження виявлених властивостей вхідних потоків та їх обслуговування було проведено ІМ зі змінною періодичністю надходження замовлень (рис. 2.4–2.6). Отримано залежності кількості відмов виконання замовлень на перевезення вантажів від випадкової періодичності їх надходження, яка задана інтервалом.

Рисунок 2.4 – Зміна кількості відмов при зміні періодичності надходження замовлень для стратегії обслуговування №1

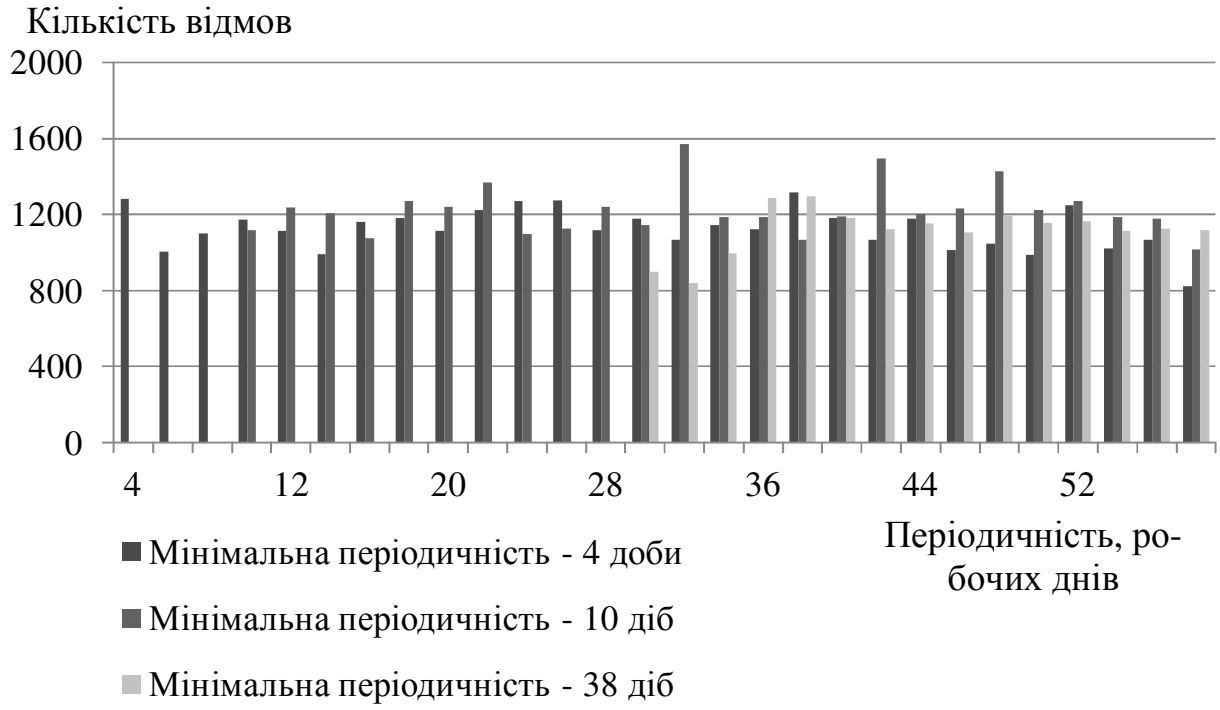


Рисунок 2.5 – Зміна кількості відмов при зміні періодичності надходження замовлень для стратегії обслуговування № 2

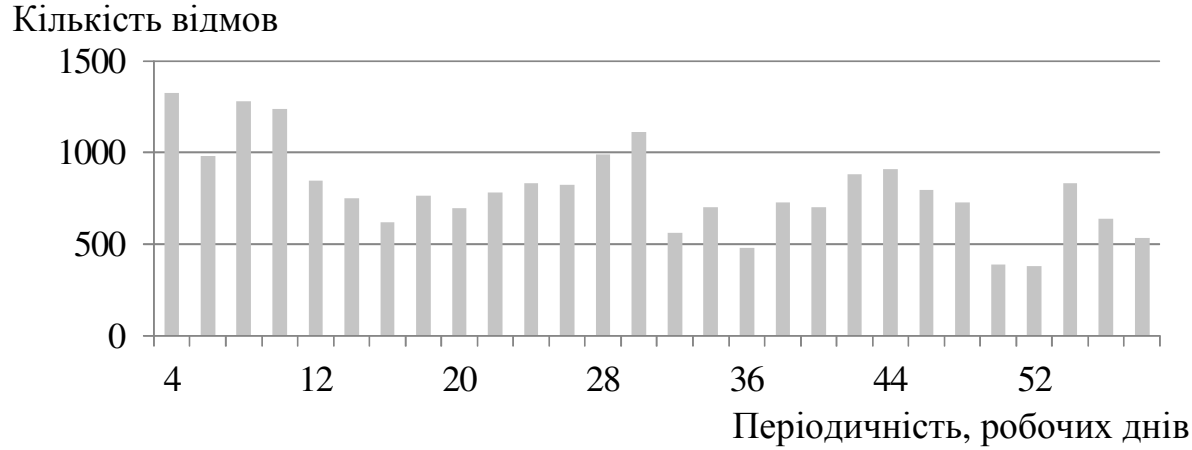


Рисунок 2.6 – Зміна кількості відмов при зміні періодичності надходження замовлень для стратегії обслуговування №3

Наприклад, інтервал періодичності 4 доби означає, що усі замовлення є одноразовими при мінімальній періодичності 4 доби. Якщо мінімальна періодичність надходження замовлень становить 4 доби, а інтервал періодичності – 28 діб, то це означає, що замовлення виникає впродовж періоду, який становить інтервал 4…32 доби. Розподіл виникнення замовлення в кожному з інтервалів – рівномірний.

Для стратегії №3 періодичність виникнення замовлень – детермінована величина. Для декількох замовлень вона може бути однаковою. Тому на рис. 2.6 подано залежність кількості відмов у виконанні замовлень від інтервалу періодичності при умові, що кількість однакових інтервалів періодичностей, які не перетинаються дорівнюють 3. Таку кратність вибрано з міркувань чистоти експерименту: середня кількість замовлень, які надійшли за добу має дорівнювати 24.

При кількості однакових періодичностей 3 і загальному інтервалі – 8 діб всі замовлення можна поділити на три групи. Перша група замовлень виникає з періодичністю 4, друга – 6, а третя – 8 діб. В іншому випадку, коли максимальна періодичність становить 28 діб, а кількість груп однакових за періодичністю замовлень становить 5, то усіх їх можна поділити так: 12, 16, 20, 24, 28 діб. Загалом це впливає на кількість нових замовлень, які надходять

перевізнику.У зв'язку з тим, що періодичність задається різницею величин $\tau_{max} - \tau_{min}$, то мінімальна періодичність є визначальною для потоку замовлень, тому на рис. 2.4 і 2.5 відповідні гістограми починаються зі значень прийнятої величини τ_{min}.

Періодичність надходження замовлень для стратегії №3 приймалась із статистичних даних про такі спостереження в 2018 році на тому ж підприємстві ТзОВ «Транс-Сервіс-1». Зокрема тут було виявлено, що періодичність надходження замовлення є величиною, прямо-пропорційною тривалості його виконання. Тому кожному замовленню було поставлено у відповідність інтервал періодичності, що відповідає його тривалості. Також виявлено, що деякі замовлення виникають з однаковою періодичністю. Тому моделювання стратегії №3 було проведено зі змінним інтервалом періодичності замовлень (див. рис. 2.6).

З наведених гістограм видно, що інтервал періодичності при рівномірному розподілі вхідного потоку замовлень не є суттєвим чинником, який впливає на кількість відмов для стратегій №1 і №2. Для стратегії №3 головним є також не інтервал періодичності а те, яка є відповідність між тривалістю транспортного циклу і його періодичністю виконання.

Натомість, при наявності відповідної інформації, проявляється циклічний коливний характер вхідних потоків замовлень на перевезення, які потрібно дослідити, відобразивши внутрішній зміст матеріальних потоків в транспортних системах.

2.2 Дискретні детерміновані моделі логістичних ланцюгів

Потоком замовлень на перевезення вантажів називають послідовність однорідних подій, які відбуваються одне за одним у випадкові моменти часу [207]. Для того, щоб відобразити сутність матеріальних потоків на МТМ , застосуємо такі принципи їх об'єктивного розгляду.

Принцип елементарності матеріальних потоків зводиться до того, що виділяється найдрібніший неподільний матеріальний елемент матеріального

потоку, а також найдрібніша неподільна частина процесу – елементарна операція. Матеріальний елемент (МЕ) входить до складу об'єднаних гуртів, якими можуть бути контейнер, транспортний пакет, гурт відправки, гурт виробництва тощо. Елементарних операцій є скінченна кількість. Елементарні операції – інваріантні за структурою і властивостями. Однак вони характеризуються такими взаємозв'язками, які утворюють крупніші структури. Завдяки скінченній кількості елементарних операцій вдається можливим синтезувати практично безкінченну кількість операцій і процесів за встановленими креитеріями.

Принцип неперервності матеріального потоку, який стосується і дискретних потоків. Для його формулювання означимо, що дискретний МП характеризується послідовністю моментів часу $t_0, t_1, \ldots t_n$ початку (завершення) елементарних операцій / групи елементарних операцій, у які відбувається якісна зміна потоку, яка полягає в зміні напрямку, швидкості руху, або кількості матеріальних елементів, які переміщаються єдиним гуртом [304]. В даному випадку принцип неперервності полягає в тому, що в будь-який i-й неперервний інтервал часу $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ в будь-якій завершеній частині МП кількість матеріальних елементів є сталою величиною. Це ж можна тлумачити так, що кількість МЕ, які входять в дану фазу МП за одиницю часу дорівнює кількості МЕ, які з цієї фази виходять.

Принцип ритмічності полягає в тому, що тривалість кожної елементарної операції є прямопропорційна до розміру гурту матеріальних елементів і обернено пропорційна інтенсивності МП, який через неї проходить, тобто справедливою є залежність для кожного i-го переділу МП:

$$\mu_i = \frac{k_i}{\tau_i}, \tag{2.1}$$

де k_i – розмір гурту МЕ τ_i – такт дискретного МП [305-307].

Надалі під МП розумітимемо сукупність виробів (в тому числі засобів і предметів праці), які за час, що не перевищує тривалості їх фізичного зносу (в тому числі старіння), міняють своє просторове розташування відносно

будь-яких двох фаз свого існування, де їх споживчі якості істотно не відрізняються. МП – це просторове переміщення предметів і засобів праці, які в ньому є незмінними [308]. Фізичною одиницею матеріального потоку вважатимемо МЕ – найдрібнішу неподільну частину МП. Переміщення МЕ в часі й просторі не впливає на його внутрішню структуру й властивості. Ці властивості проявляються тільки у взаємодії з іншими елементами МП. Назвемо такі події *елементарними логістичними операціями* (ЕЛО). Таким чином, ЕЛО – це дія, спрямована на зміну напряму, швидкості, тривалості переміщення в просторі МЕ.

На практиці застосовують терміни логістичні операції складування, транспортування, комплектування, завантаження (розвантаження), пакування, зберігання, укрупнення вантажних одиниць та інші [188]. Проте, враховуючи вищеподані означення МП й ЕЛО, усі можливі фізичні операції можна привести до декількох найпростіших типових. Це дає змогу встановити залежність структури ТП доставки вантажів на МТМ від показників динаміки дискретних МП, які він об'єднує.

Враховуючи класифікацію та взаємозв'язок параметрів ЕЛО відомі фізичні логістичні операції можна подати як комбінації ЕЛО [308]. Таким чином можна будь-який ТП, який являє собою сукупність матеріальних потоків, також подати у вигляді множини взаємопов'язаних ЕЛО. Якщо дотримуватись принципів неперервності та ритмічності МП [303], то детермінований зв'язок встановлюється між будь-якими двома ЕЛО в усьому ТП. Задаючись певними критеріями та обмеженнями, можна знайти оптимальні ТТС і параметри транспортного процесу.

Наведемо наступні терміни. За змістом перетворення МП усі операції ТП можна звести до чотирьох найпростіших ЕЛО [304, 309]:

розподільчі ЕЛО – d (англ. *distribution)*, які розділяють один дискретний МП на декілька, з білшою інтенсивністю, однак з незмінним розміром гурту МЕ, які переміщаються в просторі неподільно;

об'єднавчі ЕЛО – *u* (англ. *united*), які мають обернену дію до розподільчих, вони об'єднують МП в єдиний, менш інтенсивний, при сталому розмірі гурту МЕ;

ЕЛО нагромадження – *b* (*break up*), які сповільнюють МП шляхом укрупнення розмірів вантажних місць;

ЕЛО подрібнення (пришвидшення) – *s* (*speed up*), те ж – прискорення МП, внаслідок якого МП отримує більшу інтенсивність за рахунок того, що МЕ подрібнюються на менші за розміром гурти.

Таким чином, будь яку ТТС ТП на МТМ можна відобразити графом, вершинами якого є доконані події – ЕЛО, а зв'язки – це параметри їх перетворень: такт τ_{ij}; розмір фізично відокремленої частини МП, – гурту МЕ – k_i; фронт ЕЛО f_{ij} – кількість одиниць МП, які одночасно перебувають між двома сусідніми вершинами. Вихідними з такої моделі є параметри інтенсивності споживання вантажів (виведення їх поза межі ТП, що розглядається) – μ_ξ, де $\xi = 1,\ldots N$ – кількість кінцевих ЕЛО. В загальному випадку модель може мати декілька джерел і декілька споживачів МП, тому говоримо про існування синхронних ЛЛ. Враховуючи прийняте уявлення про ідеальний ТП, усі вони повинні бути взаємопов'язаними. Так, відношення між будь-якою парою *i, j* ЕЛО, з яких ЕЛО$_i$ передує ЕЛО$_j$, можна задати аналітичним залежностями параметрів, які залежать від типу *i*-ї ЕЛО:

$$\text{розподільча: } \tau_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^{K} \frac{1}{\tau_i}}, \tag{2.2}$$

$$\text{об'єднавча: } \tau_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^{K} \frac{1}{\tau_j}}, \tag{2.3}$$

$$\text{нагромадження: } \tau_j = \frac{k_j}{k_i}\tau_i, \tag{2.4}$$

$$\text{подрібнення } \tau_i = \frac{k_i}{k_j}\tau_j, \tag{2.5}$$

де i , j – номери, відповідно, вхідних і вихідних елементів МП.

Використовуючи таку дискретно-подійну модель, можна графічно відобразити будь-яку частину ТП, або процес цілісно. Наприклад, на рис. 2.7 показано модель частини ТП, який відбувається в транспортному пункті, головною функцією якого є виробництво товарів з інтенсивністю k_1 виробів за період τ_1, а також пакування і відвантаження транспортних пакетів з вантажомісткостями k_2, k_3.

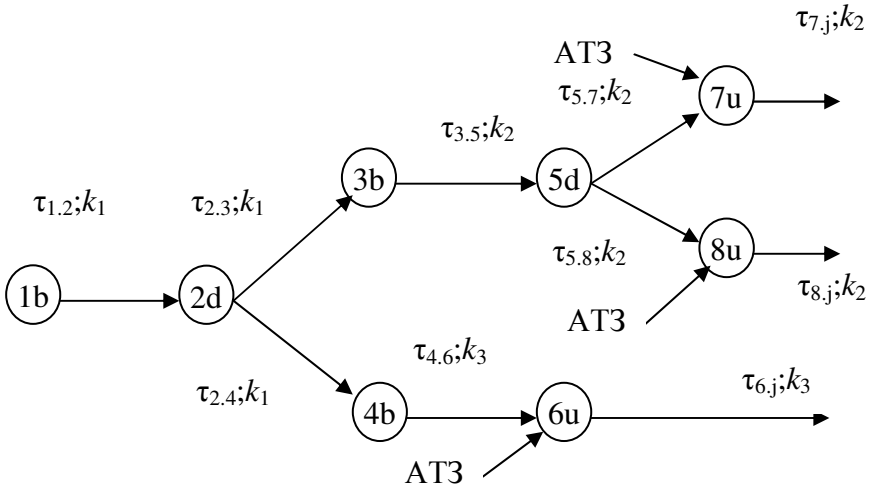


Рисунок 2.7 – ТТС транспортного пункту „виробництво”: 1-8 – номери ЕЛО; *b*, *d*, *u* – типи ЕЛО, $\tau_{i.j}$ – такт МП після перетворення на *i*-й ЕЛО; k_i– розмір *i*-го гурту елементів МП

Його функціонування полягає в тому, що вантажі спочатку об’єднуються в гурти розміром k_1 і в такому виді надходять на розподіл потоків (ЕЛО 2*d*), в результаті якого, виходячи з виразу (2.1), утворюються два повільніші МП, оскільки $\tau_{2.3} \le \tau_{1.2}$ і $\tau_{2.4} \le \tau_{1.2}$. Розподіл потоків на операції 2*d*, а потім – на 5*d* виконують для того, щоб переформатувати їх у два різні за розміром гурти відправлень (k_2,k_3), а також для інтенсифікації процесу навантаження за рахунок збільшення вантажного фронту. Так ЕЛО 6*u*, 7*u*, 8*u* відображають сполучення двох типів МП – вантажопотоків і автомобілепотоків, або, інакше, – навантаження по трьох фронтах. При цьому різноманітність за розміром гуртів вибирається з міркувань відповідності вантажності

автомобіля розміру вантажного гурту: $q_{ф,i}^{опт.} = k_i$, де $q_{ф,i}^{опт.}$ – оптимальна фактична вантажомісткість АТЗ за критерієм мінімальних енерговитрат на одиницю транспортної роботи. З транспортного пункту „виробництво" виходять три МП, які, хоча є несинхронними (відрізняються тактом і моментом початку), але організаційно залежать від параметрів $\tau_{1.2}$ і k_1. Приклад моделі іншого, проміжного вузлового пункту – терміналу, на якому виконується перенаправлення матеріальних потоків за напрямками, показано на рис. 2.8.

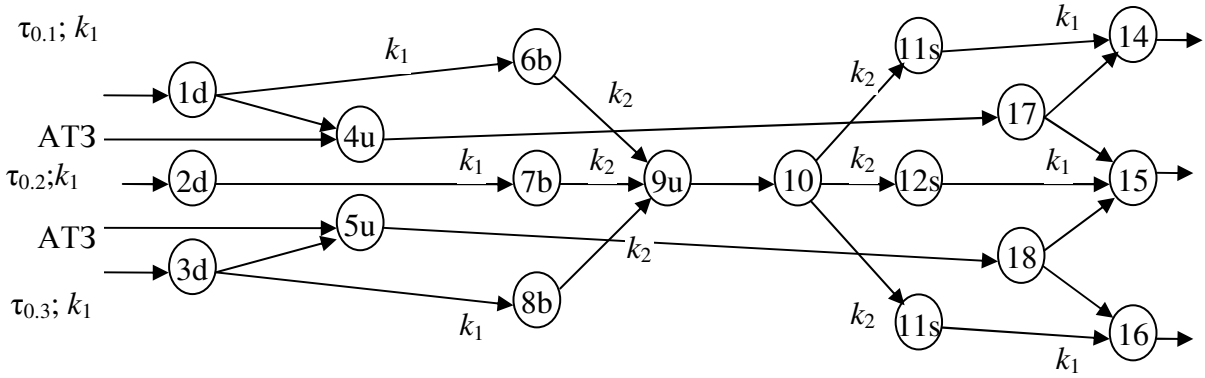


Рисунок 2.8 – Приклад ТТС транспортного пункту «термінал-перенаправлення потоків»

Транспортний вузол «термінал» працює так. У ньому передбачено три циклічні вхідні вантажопотоки, однакові за розміром гурту, але різні за кінцевим пунктом призначення і вхідним тактом. Також є два вхідні автомобілепотоки, різні за початковим пунктом відправлення і вхідним тактом. Термінал має три пости розвантаження, після проходження яких, вантажі укрупнюють в гурти розміром k_2, після чого – об'єднують у загальний обсяг відправлень (ЕЛО 9*u*). Зауважимо, що ЕЛО типу *b* в детермінованій моделі не може використовуватись для того, щоб згладити коливання параметрів вхідних потоків. Ідеальне призначення ЕЛО 6*b*, 7*b*, 8*b* – підготовка МП до нагромадження за розміром оптимальної вантажомісткості транспортних засобів, а не за часом, як це роблять при випадковому характері коливання вантажопотоків.

Розглянемо залежність параметрів ТТС на таких прикладах. Перший приклад – перевезення вантажів на однаму маятниковому маршруті (рис. 2.9). Модель на рис. 2.9 описує циклічні надходження замовлень z_1, z_2, z_3 на перевезення вантажів з періодичністю, відповідно, τ_1, τ_3, τ_4.

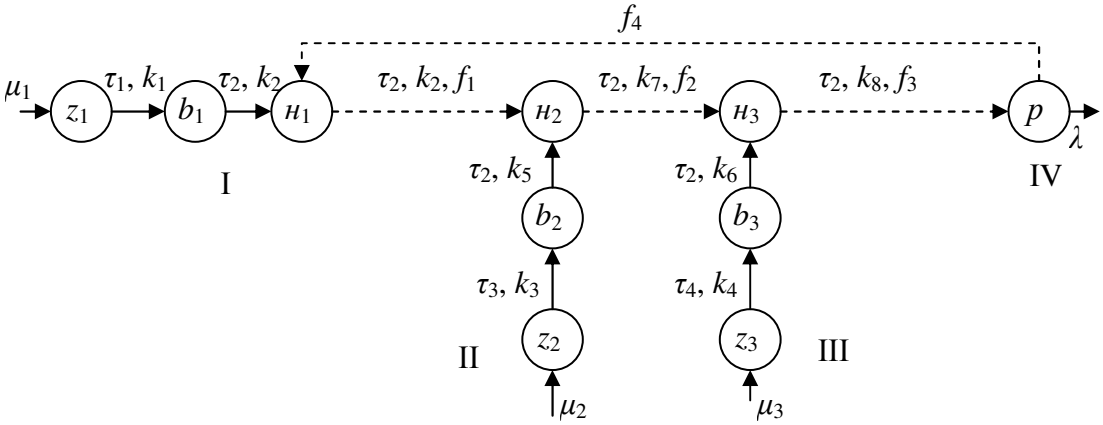


Рисунок 2.9 – ТТС для одного збірного магістрального маршруту: $z_1 \ldots z_3$ – замовлення; $b_1 \ldots b_3$ – операції нагромадження замовлень для відправки їх одним гуртом; $н_1 \ldots н_3$ – навантаження (сполучення вантажопотоків та автомобілепотоку); p – розвантаження

Середня інтенсивність надходження замовлень становить, μ_1, μ_2 μ_3 транспортних пакетів за одиницю часу. Замовлення на перевезення надходять в пункти I, II, III, а доставку їх треба забезпечити в пункт IV. Розміри вантажів одноразових замовлень – k_1 k_3 k_4 є такими, що вони менші, ніж допустима фактична вантажомісткість транспортного засобу, який використовується на цьому маршруті. Тому після навантаження $н_1$ АТЗ довантажується же в $н_2$, $н_3$, *а* розвантажується в p. Інтенсивність споживання вантажів в кінцевому пункті маршруту – λ. Використовуючи такі умови моделі, а також вирази (2.1)-(2.5), можна записати, що фактична вантажність АТЗ становитиме:

$$k_8 = k_7 + k_5 + k_2 . \qquad (2.6)$$

Враховуючи принцип неперервності МП, потрібно також врахувати, що такт роботи АТЗ на кожній ділянці збірного маршруту має бути сталим і становитиме τ_2. Таким чином:

$$\tau_2 = \frac{k_2}{k_1}\tau_1 = \frac{k_5}{k_3}\tau_3 = \frac{k_6}{k_4}\tau_4 . \qquad (2.7)$$

Оскільки τ_1, τ_3, τ_4 є задана періодичність, то зміст задачі полягає в тому, щоб підібрати розміри гуртів k_2 k_5 k_6 відправки вантажів, задаючись певним критерієм. Зокрема, максимальна тривалість доставки вантажів у пункт IV визначиться:

$$T = \tau_1 + \tau_2 + f_1 \cdot \tau_2 + f_2 \cdot \tau_2 + f_3 \cdot \tau_2 ,$$

де f_1 …f_3 – фронт автомобілів на кожній з трьох ділянок маршруту, який визначається з виразу:

$$f_i = \left\lceil \frac{\bar{t}_i}{\tau_i} \right\rceil , \qquad (2.8)$$

де $\bar{t}_i$ – математичне сподівання тривалості руху АТЗ по i-й ділянці маршруту; τ_i – такт випуску автомобілів на i-ту ділянку маршруту.

Як бачимо, вираз (2.8) представляє цілу величину, здобуту заокругленням вгору. Враховуючи залежності параметрів моделі на рис. 2.9, запишемо вираз для максимальної тривалості доставки замовлень від пункту I до пункту IV:

$$T = \tau_1 \left(1 + a \left(\left\lceil \frac{\bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \bar{t}_3}{a\tau_1} \right\rceil \right) \right), \qquad (2.9)$$

де a – співвідношення $\frac{k_2}{k_1}$.

Вираз (2.9) разом з омеженнями (2.7), (2.8) становлять лінійну задачу цілочислового програмування, формальний розв’язок якої означає підбір розміру гурту відправки вантажів з пунктів збірного маршруту задля мінімізації загальної тривалості доставки [310]. Така задача розв’язується відомими методами лінійного програмування, є відомою, і не становить інтересу подальших досліджень. У більш складному випадку можна зустріти нелінійні задачі цілочисельного програмування, як наприклад, на рис. 2.10. Ключова відмінність даної на рис. 2.10 схеми від попередньої ТТС полягає в наявності роз-

поділу вантажопотоків d_1 на два різних маршрути. При цьому розподіл може здійснюватись з різними тактами τ_3 τ_4, а також з різними розмірами гуртів k_3, k_4. В частковому випадку може бути k_3=k_4. Залежність параметрів на ЕЛО d_1 можна записати так:

$$\frac{k_2}{\tau_2} = \frac{k_3}{\tau_3} + \frac{k_4}{\tau_4}. \qquad (2.10)$$

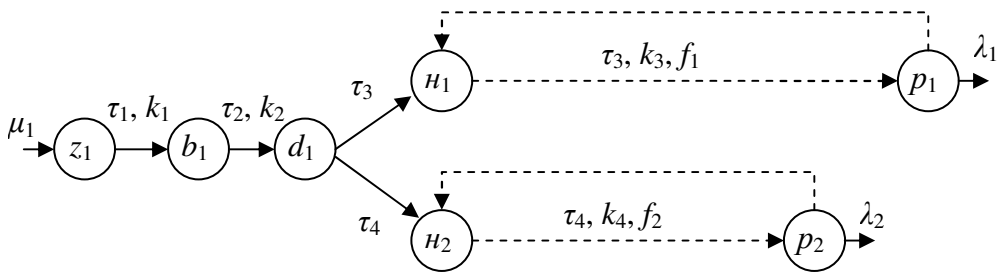


Рисунок 2.10 – ТТС взаємодії двох маятникових маршрутів: z_1– замовлення; b_1 – операція нагромадження замовлень для відправки їх одним гуртом; d_1 – операція розподілу вантажопотоків по маршрутах $н_1$, $н_2$ – навантаження (сполучення вантажопотоків та автомобілепотоку); p – розвантаження

Оскільки значення тактів – невідомі, то задача набуває характеру нелінійної задачі математичного програмування, при лінійних залежностях. Для її успішного формулювання і розв'язування необхідно чітко сформулювати обмеження, крайові умови, критерій та обґрунтувати ступінь її агрегування [304, 311].

Розв'язування задач вибору взаємозалежних параметрів циклічних магістральних ТП набуває характеру нелінійної оптимізації при таких умовах [312]:

1) наявність принаймні одного розгалуження / злиття матеріальних потоків, що приводить до обернених залежностей типу (2.10);

2) наявність хоча б на одній фазі ТП операцій з невідомими параметрами k і τ, що приводить до невизначеності стосовно виразу (2.7);

3) використання у ТП АТЗ різних за вантажністю із обмеженням загальної їх кількості.

В результаті загального аналізу топологій МТМ, було визначено, що усі можливі транспортні пункти, що задіяні у вантажообігу та автомобілепотоках, можна класифікувати за ознаками елементарних функцій на такі типи: а) виробники; б) термінали перенаправлення потоків; в) термінали збірно-розподільчі за розміром відправлень; г) кінцеві споживачі; д) автотранспортні парки. Приклад моделі ТП на МТМ – на рис. 2.11.

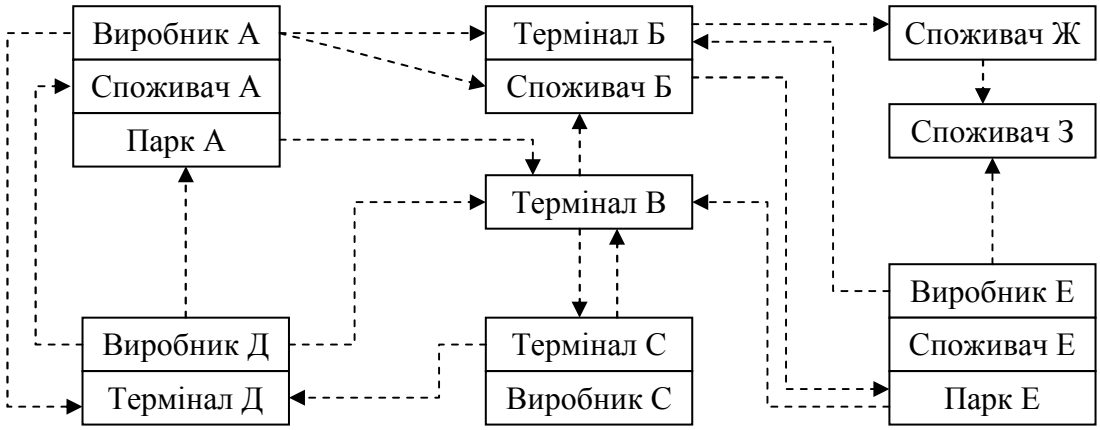


Рисунок 2.11 – Приклад моделі ТП на МТМ

Також можливі комбіновані транспортні пункти, які складаються з декількох найпростіших. Вони компактно локалізовані, тому стосуються місцевих транспортних мереж. Усі інші варіанти суперечать розумінню ідеального ТП. Така агрегатована модель має певні особливості, які дають можливість використати її задля досягнення поставленої мети. По-перше, зв'язки між її вершинами – дуги, які мають декілька параметрів: а) такт τ_{XY}; б) k_X, який може мати зміст розміру вантажного гурту, або фактичної вантажомісткості АТЗ; в) фронт взаємодії транспортних пунктів – f_{XY}; г)витрати ресурсів на переміщення гурту матеріального потоку – e_{XY}, де *X, Y* – позначення транспортних пунктів. Зв'язки між вершинами – структурно незмінні. Вони базуються на усталеній маршрутній схемі регіону, що розглядається. Задача маршрутизації на МТМ в цих дослідженнях не розглядалась. Тут вона вважалась тривіальною, бо: а) на даний час в міжміських гуртових перевезеннях склалися транспортні коридори – наслідок соціально-економічного розвитку

держав; б) магістралі є такими довгими шляхами, що між будь-якими двома пунктами якщо й існує сполучення, то воно найкоротше і, як правило, єдине [312].

По-друге, така модель є невпорядкованою. Тобто за нею не можна назвати однозначного розкладу виконання ЕЛО, оскільки вона містить замкнені цикли [181]. Для того, щоб їх прибрати, потрібно підібрати відповідні значення такту кожної дуги моделі. І якщо деякі такти набувають значень $\tau_{ij} = \infty$, то згідно з виразами (2.1)-(2.4) матеріальні потоки між *i, j* ЕЛО формально розриваються. Відповідного числового значення ці ваги набувають відносно критерію – мінімальної гарантованої тривалості доставки будь-якого гурту вантажів:

$$T_{\min} = \max_i \{T_i\} = \max_i \left\{ \sum_{X=i_1}^{i_\xi} \sum_{Y=j_1}^{j_\xi} \tau_{XY} \cdot f_{XY} \right\} \to \min, \qquad (2.11)$$

де *X, Y* – номери вершин, які входять в *i*-й ланцюг ЕЛО, в якому i_1 – початкова вершина ланцюга (виробник МП), i_ξ – кінцева вершина ланцюга (споживач вантажів).

Формальний зміст задачі впорядкування графа G_0, полягає в тому, щоб кожній його дузі приписати такі ваги, щоб виконувались критерій (2.6). Враховуючи характер залежностей (2.2)…(2.4), а також цілочисельний спосіб обчислення фронтів виконання ЕЛО – f_{ij} і суперечливий зміст критеріїв, задача впорядкування моделі є оптимізаційною нелінійною задачею математичного програмування [196].

Кожну з названих ЕЛО можна графічно змоделювати як дугу між двома вершинами, одна з яких означає початок впливу на переміщення МЕ, інша – закінчення. Такт у даному випадку – це період між початком (закінченням) двох сусідніх ЕЛО. Якщо ці ЕЛО – прямоточні (фронт їх виконання дорівнює одиниці), то виконується нерівність:

$$\tau \geq t_{AB}, \text{ хв.} \qquad (2.12)$$

де t_{AB} – ймовірна тривалість виконання ЕЛО A, хв.

Розглянемо дві циклічні ЕЛО, які відображено на рис. 2.12.

Рисунок 2.12 – Зв'язок такту з тривалістю ЕЛО

Якщо ЕЛО A виконана в момент t_1, то це означатиме, що з цього моменту МЕ перестане переміщатися, тобто наступить операція зберігання. Проте, ЕЛО B ще не настала. Отже, нерівність (2.12) перечить означенню ЕЛО. В строгому розумінні потрібно замість нерівності (2.12) приймати рівність, а між тактом і тривалістю двох сусідніх ЕЛО повинні існувати детерміновані зв'язки. Якщо розглянути циклічну ЕЛО (рис. 2.13), яка розпочинається в моменти A_i, а завершується в моменти B_i, $i = 1…n$, то за означенням тактом назвемо відрізки часу, між початками (завершеннями) двох ЕЛО i та i+1. Як видно з рис. 2.13, тривалість операції $A - t_{A_iB_i} > \tau_i$. Якщо припустити, що τ_i = const, то цю тривалість можна знайти із співвідношення:

$$t_{AB} = \tau \cdot f \,, \tag{2.13}$$

де f – фронт елементарних логістичних операцій – ціле невід'ємне число.

Отже, тривалість і такт ЕЛО в загальному розумінні – не тотожні.

2.3 Класифікація циклічних транспортних процесів

Модель ТП на МТМ подамо у вигляді послідовності ЕЛО, які пов'язані організаційними параметрами, утворюють детерміновані ЛЛ. Вихідними даними тут є вимоги споживачів щодо термінів і обсягів постачання вантажів, властивості технологічного базису та вантажів. ЛЛ поєднуються, як правило, одним джерелом вантажопотоків [187], або ж декількома, для яких відомо було розмір споживчих і/або транспортних пакетів [313].

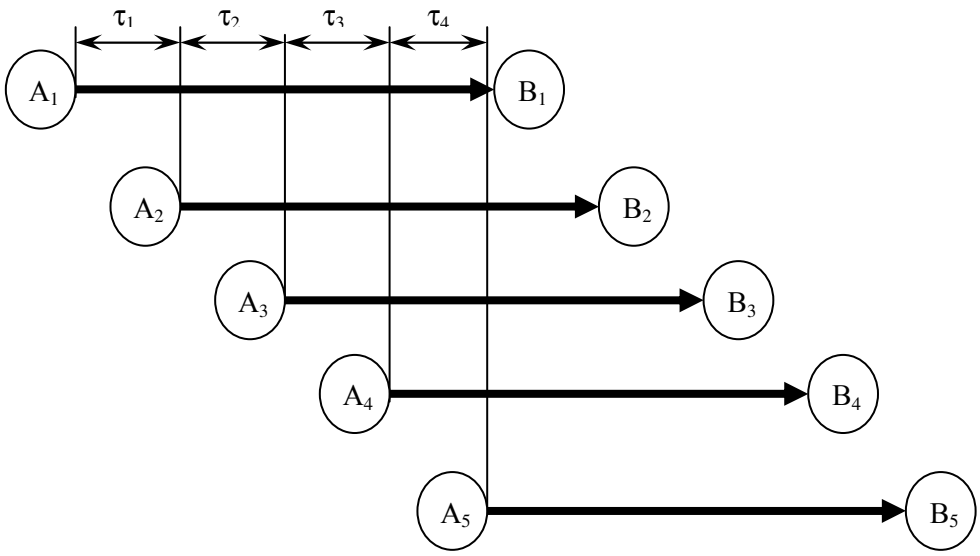


Рисунок 2.13 – Зв'язок такту з тривалістю елементарних логістичних операцій, для яких числове значення фронту: $f > 1$

Зміст задач такого типу полягав у виборі кількості і вантажності АТЗ, щоб обслужити заданий вантажопотік. Тому невідомими є цілочислові змінні – чисельність вантажних одиниць, які потрібно перевезти за даною ТТС, на певній фазі ТП. Структурні моделі, які аналізувались при цьому, були визначеними в якісному плані, тобто набір ЕЛО, які входять до кожної моделі, був сталим. Це не давало змоги провести дослідження ТП в повному діапазоні можливої інтенсивності. Інший недолік – неможливо застосувати релейне перемикання моделі, наприклад при певних умовах заборонити вантажопотік по одному із розгалужень моделі. Адже така модель базується на принципі нерозривності потоку: $\mu_i = \frac{k_i}{\tau_i} = const$. Якщо МП інтенсивністю $\mu_{\text{сум.}}$ має розгалуження $\mu_{\text{сум.}}=\mu_1+\mu_2+\ldots+\mu_m$, і при певних умовах один з його напрямків ξ потрібно ліквідувати, тобто призначити $\mu_\xi=0$, то у сформульованій задачі такий розв'язок буде неможливим, оскільки, згідно з (2.10) неможливо призначити $\tau_i=\infty$ при $k_i=const$. Методи цілочислового програмування тут непридатні. Нелінійна модель ТП, в цілому, у цих дослідженнях має аналогічний вид. Її особливості:

- наявність декількох джерел матеріальних потоків: виробників тарно-поштучних вантажів, парків АТЗ;

- регіональних характер МТМ, який відображено тим, що такт випуску АТЗ на маршрут є значно меншим, ніж тривалість руху того ж автопоїзда по маршруту;

- наявність декількох розподільчих центрів, терміналів, що у модель вносить ЕЛО сполучення та розподілу вантажопотоків. Такі особливості привели до необхідності змін до відомого формулювання задачі [187].

Кожна структурна модель ТП, яка створена у цих дослідженнях, є унікальною, тобто вона характеризується лише властивими для неї залежностями, умовами і обмеженнями. Однак, усі використані нами моделі мають деякі спільні особливості. По-перше, змінними усіх моделей є параметри інтенсивності матеріальних потоків на тих фазах ТП, які є невизначеними у зв'язку з розподілом потоків та їх злиттям: λ_i – інтенсивність вхідного потоку від *i*-го джерела, μ_j – інтенсивність МП в межах однієї фази ТП. По-друге, моделі ТП такого ґатунку можуть змінювати свою структуру залежно від сумарної інтенсивності МП, які через них проходять. Але залежності параметрів ЕЛО при цьому не змінюються. Це означає, що вони містять перемикачі, які можна виразити через присвоєння інтенсивності певному напрямку матеріального потоку нульового значення. Вираз (2.10) і принцип нерозривності при цьому зберігається. По-третє, всі показники ефективності обчислюються залежно від якісного складу ТП. Спільним для різних ТТС є тільки спосіб визначення критерію. Головний показник даного класу задач – гарантована мінімальна тривалість доставки:

$$T = \max_j \left\{ \sum_{j=1}^{N} \frac{k_j}{\mu_j} f_j \right\} \to \min , \qquad (2.15)$$

де f_j – фронт матеріальних елементів в рамках одної фази ТП.

Або після перетворення виразу для фронту, отримуємо:

$$T = \max_j \left\{ \sum_{j=1}^{N} \frac{k_j}{\mu_j} \left\lceil \frac{\mu_j}{k_j} t_j \right\rceil \right\} \to \min \qquad (2.16)$$

де t_j – тривалість *j*-ї ЕЛО, j=1…N.

Вираз, взятий в прямокутні дужки означає заокруглення до більшого цілого. Обмеження:

- на інтенсивність вихідних потоків:

$$\sum_i \mu_{вх.i,j} = \mu_j \text{, або } \sum_i \frac{k_{i,j}}{\tau_{i,j}} = \mu_j \qquad (2.17)$$

де $\mu_{вх.i,j}$ – *i*-й вхідний потік до *j*-го кінцевого споживача; μ_j – інтенсивність споживання у *j*-го споживача;

- на вхідні потоки:

$$\sum_i \frac{k_i}{\lambda_i} = \sum_j \mu_j \,, \qquad (2.18)$$

де λ_i – інтенсивність вхідних потоків від кожного *i*-го джерела;

- на кількість автомобілів:

$$\left\lceil \frac{t_j}{\tau_j} \right\rceil = \left\lceil \frac{\mu_j}{k_j} \cdot t_j \right\rceil \le f_{j\max} \qquad (2.19)$$

де *j* – номер ЕЛО, де задіяні АТЗ *j*-го типу;

$f_{j.\max}$ – максимальна кількість АТЗ *j*-го типу, які дозволені до використання у даній задачі.

Таким чином, взявши до уваги вираз (2.15) та обмежень (2.16)-(2.19) задачі з багатьма змінними, віднесемо її до нелінійних неопуклих задач математичного програмування. Очевидно також, що функція (2.15) – недиференційована. Для розв'язування таких задач застосовують, як правило, числові методи, або такі, що дають приблизний розв'язок за допустимий час і з допустимою похибкою. Нами був застосований алгоритм нелінійного програмування пакету Solver, який закладений в електронних таблицях Excel – градієнтний метод [196] (додаток Б). Однак, у даному випадку потрібен не один, а множина розв'язків, які стосуються змінних вхідних даних – змінного сумарного попиту на доставку вантажів до різних споживачів. Якщо початкові значення змінних λ_i та μ_j на початку пошуку оптимуму будуть дорівнювати нулю, то програма видає свою неспроможність знайти потрібний розв'язок і дотриматись умов та обмежень. Тому пошук усього діапазону результатів

розпочато з граничного значення сумарного потоку, $\mu_{\text{сум.}} = \mu_{\text{сум.min}}$ – мінімального вихідного МП, заради якого взагалі варто організовувати ТП з допомогою лише одного автомобіля. Це значення обчислюється як для одиничного процесу відправлення вантажу від найближчого відправника до споживача, який має найменший попит за один цикл. При цьому постачання здійснюється поза розподільчими пунктами, посередниками та терміналами. При таких умовах організаційні параметри ТП є однозначно визначеними і їх легко можна обчислити. Збільшуючи $\mu_{\text{сум.}}$ на деякий, достатньо малий крок $\Delta\mu_{\text{сум.}}$, знаходимо оптимальні розв'язки до максимального значення $\mu_{\text{сум.max}}$, збільшуючи яке ми не зможемо більше знайти допустимий розв'язок через накладені обмеження. У першу чергу, це стосується заданої кількості АТЗ, які можуть працювати на тому, чи іншому маршрутах. Діапазон вхідних величин $\mu_{\text{сум.min}} \ldots \mu_{\text{сум.max}}$ є областю визначення оптимальних ТП даного типу.

Для практичного застосування методики, крім загальних ознак транспортних процесів, таких як кількість елементарних логістичних операцій, відповідно: N_{Σ} – загальна, $N_{\text{ЕЛО.Пр}}$ – подрібнення, $N_{\text{ЕЛО.Ск}}$ – скупчення, $N_{\text{ЕЛО.Сп.}}$ – сполучення, $N_{\text{ЕЛО.Р.}}$ – розподілення МП, введено ще відносні показники, які характеризують потенціал ТП при його оптимізації. Це – рівень вертикальної концентрації ЕЛО, який визначався за виразом:

$$\eta_V = \frac{V_{\max}}{N_{\Sigma}}, \tag{2.20}$$

де $V_{\max}$ – максимальна кількість ЕЛО, які стосуються різних МП, але виконуються одночасно в даний момент виконання ТП.

Рівень вертикальної концентрації характеризує степінь розгалуженості ТП. Як відомо, розгалуження систем однорідними операціями приводить до резервування їх продуктивності й підвищення надійності [313]. Тому, чим вище його числове значення (теоретично можливе – 1,0), тим більшої продуктивності може досягнути ТП. При цьому ТП буде краще пристосований до змін інтенсивності потоків. З іншого боку, наявність резервних потоків у ТП приводить до збільшення чисельності запасів товарів, які перебувають в русі,

або на складах по дорозі до споживачів, чисельності задіяних АТЗ і збільшення тривалості поставок в окремих ланцюгах.

Рівень горизонтальної концентрації визначався за виразом:

$$\eta_H = \frac{H_{\max}}{N_\Sigma}, \tag{2.21}$$

де $H_{\max}$ – кількість ЕЛО, які розташовані послідовно в найдовшому ланцюгу ТП.

Цей коефіцієнт є мірою перетворення МП в ТП. Для прискорення і здешевлення переміщення товарів його укрупнюють в більші гурти, застосовують великовантажні АТЗ, але оскільки кінцевому споживачеві він постачається дрібним гуртом, то в результаті отримуємо послідовність ЕЛО, які спочатку сповільнюють, а потім прискорюють МП. Чим вище значення коефіцієнта η_{H}, тим нерівномірніший за інтенсивністю МП в ТП. А це означає, що його тривалість при цьому збільшується й збільшуються затримки доставки вантажів.

Як приклад розглянуто три моделі циклічних процесів доставки виробів від трьох джерел до трьох споживачів, які розташовані на фіксованій МТМ й характеризуються відомою інтенсивністю попиту однорідної продукції, відповідно μ_1 μ_2 μ_3, одиниць / год. ТП відображений графом, вершинами якого є моменти завершення ЕЛО, а дуги означають перебіг цих операцій. Усі вершини, а також їх зв'язки поділяються на чотири типи, згідно із видом перетворення матеріального потоку. Кожній дузі у графі надано індекс. Кожна дуга також має чотири кількісні оцінки: τ_{i} – такт; t_{i} – математичне сподівання випадкової величини, тривалості; k_{i} – розмір гурту матеріальних елементів, які переміщуються в часі і просторі разом; f_{i} – фронт, тобто кількість матеріальних елементів, які в одній логістичній операції переміщаються синхронно, але не разом. Взаємозалежність цих параметрів, способи їх оцінювання описано в роботі [187].

Згідно з першою ТТС (рис. 2.14) готові товари виробляються на трьох підприємствах B_1, B_2, B_3.

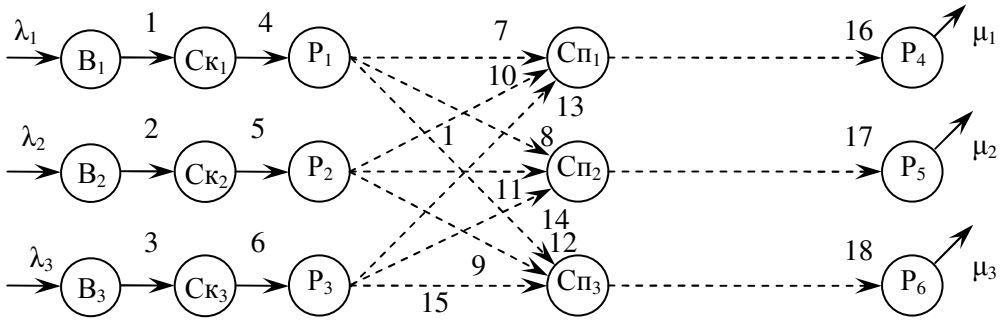


Рисунок 2.14 – Транспортно-технологічна схема № 1: 1…18 – номери елементарних логістичних операцій; $В_1…В_3$ – виробництво; $Ск_1…Ск_3$ – пакування у транспортні пакети + складування; $Сп_1…Сп_3$ – сполучення вантажопотоків + формування гурту відправлення; $Р_4…Р_6$ – розвантаження у кінцевих споживачів

Інтенсивність кожного виробництва, λ_1 λ_2 λ_3 є такою, щоб забезпечити споживання товарів з інтенсивностями, відповідно, μ_1 μ_2 μ_3, тобто за умови сталого попиту виконується рівність:

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3, \text{ одиниць/год.} \qquad (2.22)$$

Після цього товари, що випускаються виробничим гуртом, відповідно, $k_1…k_3$ пакують в більші гурти $k_4…k_6$ – транспортні, і складують для того, що, відправити до одного з посередників, які формують крупніші відправки до кінцевих споживачів. Розподіл вантажопотоків від складів виробників до посередників здійснюється для того, щоб покращити показники надійності й якості доставки. Власне, розміри вантажопотоків $\mu_7…\mu_{15}$ є невідомими змінними у задачі оптимізації цієї ТТС. У вершинах $Сп_1…Сп_3$ її моделі відбувається сполучення потоків для того, щоб задовольнити попит споживачів, тобто щоб виконувались умови $\mu_{16}=\mu_1$, $\mu_{17}=\mu_2$, $\mu_{18}=\mu_3$, з одного боку, і забезпечити відправлення великовантажних АТЗ, а також їх високу продуктивність при транспортуванні до пунктів розділення автомобілепотоків і вантажопотоків (розвантаження) $Р_4…Р_6$. Кількість автомобілів є обмеженою. Розмір гуртів відправлення є фіксованим: він формується умовами рентабельного фактичного завантаження автопоїздів і для розв'язування задачі є відомим – $k_{16}…k_{18}$.

Випуск автомобілів з вантажами відбувається за такт $\tau_{16}\ldots\tau_{18}$. У цих дослідженнях не передбачається можливість вибору транспортних засобів за вантажомісткістю. Транспортування відбувається за маятниковими маршрутами, як при доставці вантажів посередникам впродовж часу $t_7\ldots t_{15}$, так і від посередників до кінцевих споживачів, тривалістю $t_{16}\ldots t_{18}$. Якщо для будь-якого i-го маршруту характерно, що $t_i > \tau_i$, то на ньому буде працювати кількість автомобілів, яку можна визначити з виразу (2.18). Якщо $t_i < \tau_i$, то $f_i=1$. На маршруті є пункти призначення вантажу (у даному прикладі – три P_4, P_5, P_6). Кожен з цих пунктів характеризується середньою інтенсивністю споживання заданих вантажів, яка є сталою впродовж деякого періоду. На схемі 1 – це μ_1, μ_2, μ_3. Для дискретного МП, яким є вантажопотік поштучних тарних вантажів, інтенсивність можна виразити за (2.20). Якщо змінюється попит, то повинні змінюватись усі параметри схеми №1, які пов'язані з ним і між собою такими залежностями:

- на першій фазі ТП: $\tau_1 = \frac{k_1}{\lambda_1},\ \tau_2 = \frac{k_2}{\lambda_2},\ \tau_3 = \frac{k_3}{\lambda_3}$;

- на другій фазі ТП: $\tau_4 = \frac{k_4}{k_1}\tau_1,\ \tau_5 = \frac{k_5}{k_2}\tau_2,\ \tau_6 = \frac{k_6}{k_3}\tau_3$;

- на третій фазі ТП, коли відбувається поділ потоків, маємо:

$$\frac{k_{16}}{\tau_{16}} = \frac{k_7}{\tau_7} + \frac{k_{10}}{\tau_{10}} + \frac{k_{13}}{\tau_{13}},\ \frac{k_{17}}{\tau_{17}} = \frac{k_8}{\tau_8} + \frac{k_{11}}{\tau_{11}} + \frac{k_{14}}{\tau_{14}},\ \frac{k_{18}}{\tau_{18}} = \frac{k_9}{\tau_9} + \frac{k_{12}}{\tau_{12}} + \frac{k_{15}}{\tau_{15}};$$

- на четвертій, останній фазі ТП: $\tau_{16} = \frac{k_{16}}{\mu_1},\ \tau_{17} = \frac{k_{17}}{\mu_2},\ \tau_{18} = \frac{k_{18}}{\mu_3}$.

Величини $k_1\ldots k_{18}$ – цілі наперед задані константи. Їх числові значення визначені такими факторами: допустимим рівнем фактичної рентабельної вантажомісткості АТЗ; стандартними розмірами упаковки; застосованими технічними засобами пакування, навантаження. Враховуючи такі залежності, сформулюємо задачу. Критерій, згідно з виразом (2.18) – мінімальна гарантована тривалість доставки – максимальний час доставки за найдовшим ЛЛ

має бути найменшим (або не перевищує наперед заданого значення). В цій моделі цей критерій визначається з шести ланцюгів $T_1 \ldots T_6$:

$$\max \left\{ \begin{array}{c} T_1 = \tau_1 + \tau_4 + f_7 \cdot \tau_7 + f_{16} \cdot \tau_{16} \\ \vdots \\ T_6 = \tau_3 + \tau_6 + f_{15} \cdot \tau_{15} + f_{18} \cdot \tau_{18} \end{array} \right| \rightarrow \min, \qquad (2.23)$$

У виразі (2.23) числові значення фронтів ЕЛО №№ 1…6 дорівнюють одиниці, то відповідні коефіцієнти доданків $\tau_1 \ldots \tau_6$ упущено.

Другий критерій, який застосовано – мінімальні сумарні затримки доставки – які пов'язані з тим, що графік вантажопотоків є неузгодженим з ритмічністю процесу, в результаті тривалість окремих операцій є значно меншою, ніж такт – період часу для її циклічного виконання:

$$Z = \sum_{i=1}^{6} T_i \cdot \mu_i - T_{\min} \cdot \mu_\Sigma, \qquad (2.24)$$

де перший член виразу – це сумарні витрати часу на доставку вантажів, які переміщаються в ТП за одиницю часу по усіх ЛЛ; другий член – мінімально можливі витрати часу на доставку. Фактично, затримки доставки в цих дослідженнях – це ідеалізоване розуміння процесу переміщення матеріальних елементів, коли вони безупинно транспортуються до споживачів.

Третій критерій – сумарні запаси вантажів, які переміщаються в даному ТП, тобто перебувають на шляху від виробників до споживачів на складах, на АТЗ, в обробці. Його визначали з виразу:

$$F_{сум.} = \sum_i f_i \cdot k_i, \qquad (2.25)$$

де i=1…N – номери усіх ЕЛО, з яких складається ТП.

Змінні першої ТТС – $\mu_7 \ldots \mu_{15}$. Усі її інші параметри визначено з рівнянь (2.21)-(2.24). Для заданого μ_Σ потрібно вибрати такі значення змінних, за яких критерії є мінімальні. Задача має оптимізаційний характер за кожним з критеріїв. Адже якщо зменшувати тривалість доставки, скорочувати затримки товароруху, чи обсяги вантажів в обігу в системі збуту, то це приводить до зростання необхідної кількості автомобілів, що суперечить обмеженням. ТТС

№2 відноситься до частково розгалужених (рис. 2.15). Ця видозміна ТП має аналогічне як і ТТС №1 призначення. Тобто є ті самі споживачі, відстань від яких до виробників – та ж. Обсяги споживання вантажів перерозподілені аналогічно. У схемі №2 діє один розподільчий центр (на рисунку окреслений прямокутником – $Сп_1$-$Р_1$. Різниця логістичних процесів між схемою №1 і №2 полягає у тому, що цей центр приблизно рівновіддалений як від виробників, так і від споживачів.

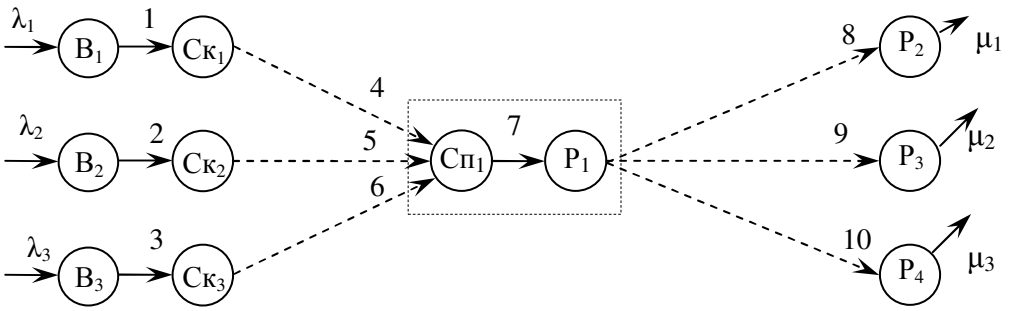


Рисунок 2.15 – ТТС № 2: 1…10 – ЕЛО; $В_1…В_3$ – виробництво; $Ск_1…$ $Ск_3$ – пакування + складування; $Сп_1$ – сполучення вантажопотоків + формування гурту відправлення; $Р_4…Р_6$ – розвантаження у кінцевих споживачів

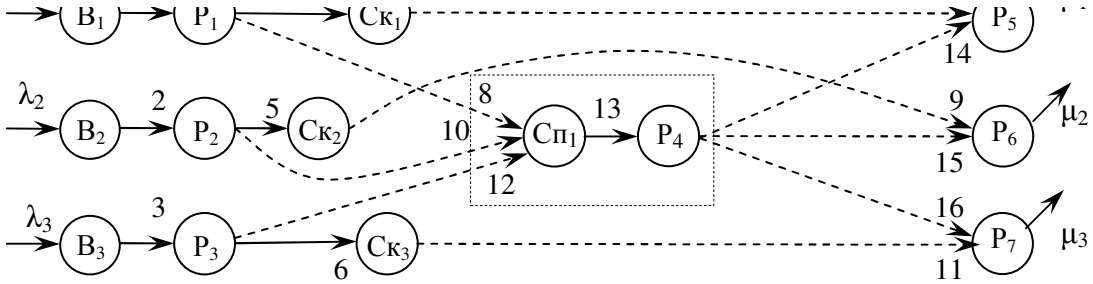


Рисунок 2.16 – ТТС № 3: 1…10 – номери ЕЛО; $В_1…В_3$ – виробництво; $Ск_1…$ $Ск_3$ – пакування + складування; $Сп_1$ – сполучення вантажопотоків + формування відправлення; $Р_4…Р_6$ – розвантаження у кінцевих споживачів

До нього вантажі відправляють зі складів виробників у сформованих сталих за розміром гуртах $k_4…k_6$. В розподільчому центрі відбувається перерозподіл вантажів за напрямком і за обсягами споживання. При моделюванні виявилось, що ТТС №2 має дещо більший діапазон інтенсивностей потоку, який сягає 17 одиниць/год., у той час як схема №1 – лише 15 одиниць/год. (див. рис. 2.15). ТТС №3 – комбінована. У ній вантажі також постачаються

споживачам через розподільчий центр. Але, на відміну від схеми №2, тут є можливість і прямої поставки від виробників до споживачів великовантажними АТЗ. Отримано також дещо інші залежності (рис. 2.17-2.19). ТТС №3 також відноситься до розгалужених. Для неї характерно, що вона може забезпечити доставку вантажів до трьох споживачів із сумарною інтенсивністю 27 одиниць/год., що на 44,5% більше, ніж ТТС №1. При цьому і сумарні затримки доставки вантажів за ТТС №3 є найменші. Якщо співставити ці показники з показниками структури, то отримаємо таке порівняння (табл. 2.2, 2.3).

Таблиця 2.2 – Порівняння структурних ознак ТП

№ ТТС	Кількість ЕЛО				Коефіцієнти концентрації ЕЛО	
	загальна	розподілу	сполучення	скупчення	вертикальної	горизонтальної
1	15	6	3	6	0,5	0,22
2	11	4	1	6	0,3	0,4
3	14	6	1	7	0,375	0,31

Таблиця 2.3 – Порівняння властивостей ТТС

№ ТТС	Діапазон інтенсивності потоку, од./год. (min … max)	Гарантована тривалість доставки, год.		Сукупні затримки процесу, год.		Запас вантажів в обігу, одиниць	
		для μ=5 од./год.	для μ=15 од./год.	для μ=5 од./год.	для μ=15 од./год.	для μ=5 од./год.	для μ=15 од./год.
1	0,1…15	128,1	54,1	315,5	557,9	361	531
2	0,1…17	63,7	48,4	145,2	544	211	444
3	0,1…27	86,8	33,6	71,4	394	198	328

Знайдені залежності $T(\mu_\Sigma)$, $Z(\mu_\Sigma)$, $F_{сум.}(\mu_\Sigma)$ подано на рис. 2.18-2.2019. Середні й великі транспортні системи є інтегрованими, об'єднують декілька ЛЛ, характеризуються нелінійними співвідношеннями організаційних параметрів [89].

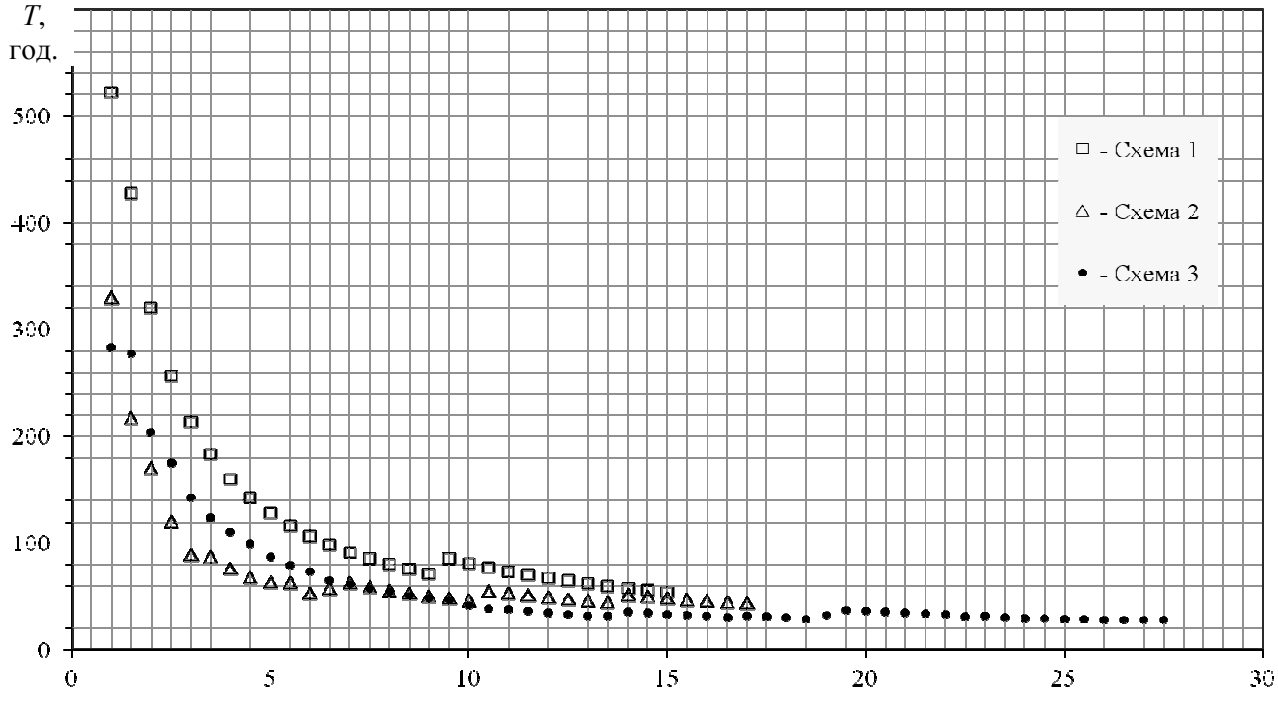


Рисунок 2.17 – Залежність тривалості гарантованої доставки вантажів від типу ТТС й інтенсивності сумарного вантажопотоку у ТП

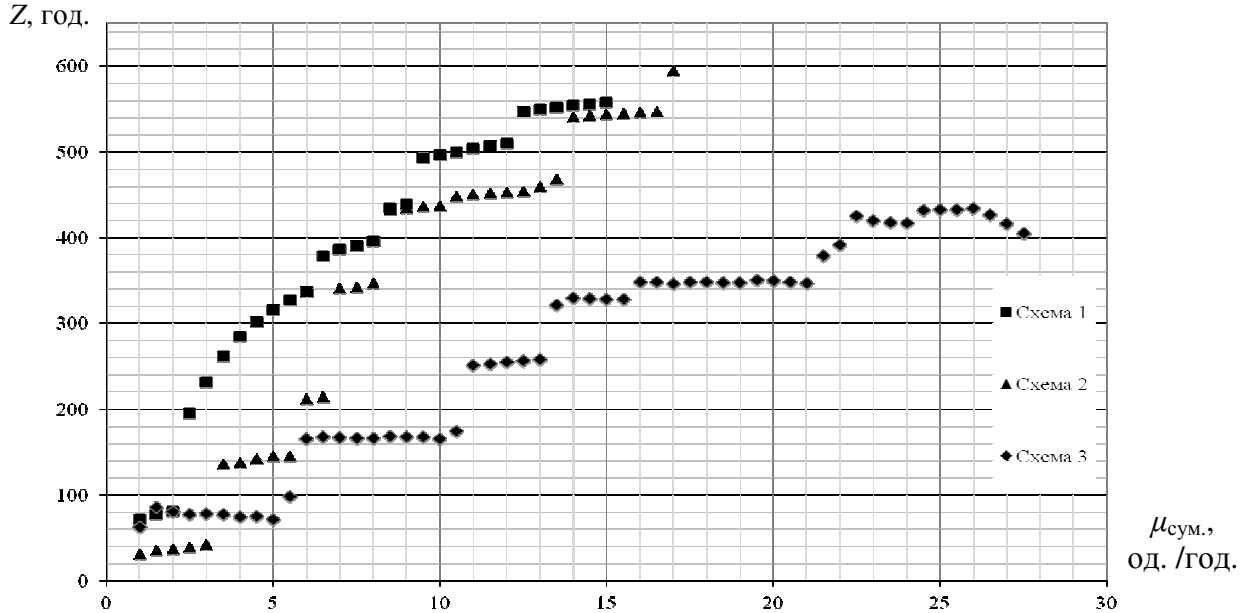


Рисунок 2.18 – Залежність сумарних затримок доставки вантажів від типу ТТС й інтенсивності сумарного вантажопотоку в ТП

Якщо ТП у тахих ТТС містить розподільчі операції, то для його оптимізації недоцільно використовувати ТТС з цілочисловими змінними. У більшості випадків відомі методи нелінійного програмування не дають для неї необхідних розв’язків і не забезпечують дотримання обмежень [308].

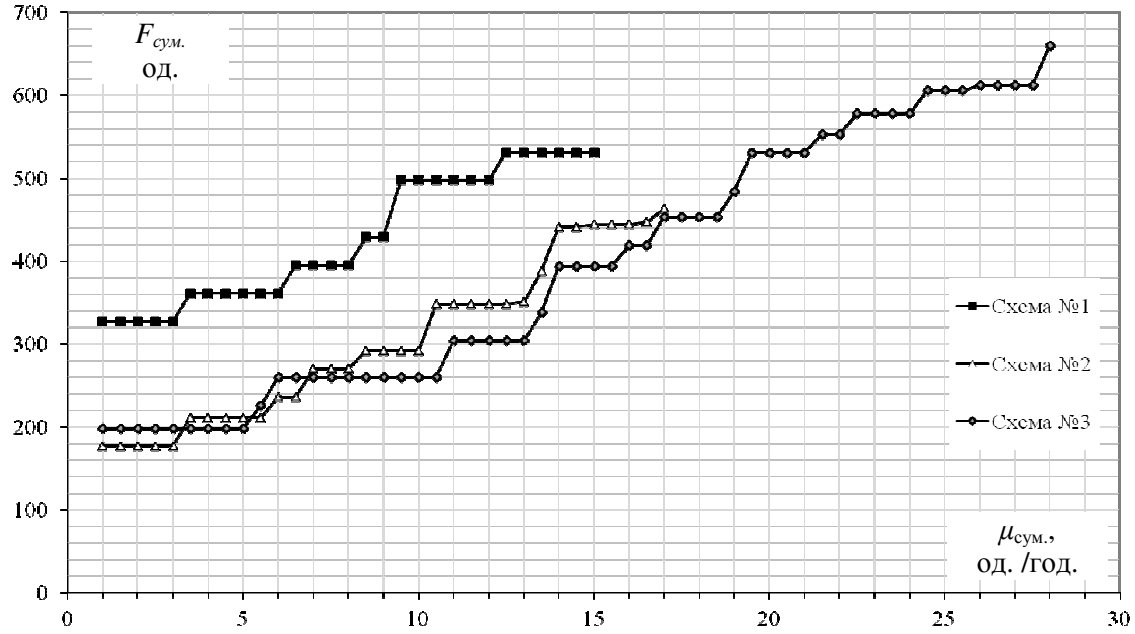


Рисунок 2.19 – Залежність сумарних запасів вантажів в обігу від типу ТТС й інтенсивності сумарного вантажопотоку у ТП

Якщо розв'язувати задачу структурної оптимізації ТП в рамках великої ТС за часовими критеріями, як от гарантованої тривалості доставки, сумарних часових затримок доставки, то в якості обмежень доцільно вибрати провізні спроможності наявного парку АТЗ. Розмір транспортних пакетів, вантажомісткість АТЗ, розмір транспортного гурту вантажів слід взяти сталими, в іншому випадку це приведе до додаткових невизначеностей в моделі й унеможливить гарантування оптимального розв'язку. Залежність мінімального гарантованого терміну, затримок доставки і кількість одиниць вантажу в ТП нелінійно змінюються зі збільшенням сумарного вантажопотоку. Термін доставки зменшується до стійкого мінімального значення дискретно і асимптотично, а затримки процесу і запаси зростають. Якщо використовувати залежності $T(\tau)$, або $Z(\tau)$, то можна побудувати параметричний ряд таких ТТС, яким властиві найнижчі числові значення цих показників.

2.4. Залежність показників ефективності ТП від інтенсивності матеріальних потоків

Використовуючи часовий граф, ми побудували залежності параметрів ефективності ТП від показника її динаміки – такту τ_1. Такими параметрами розглядалися: термін доставки готової продукції кожному конкретному спо-

живачеві, ритмічність доставки, фронт робіт, необхідна кількість автомобілів наперед визначеної вантажності, коефіцієнт використання фонду часу автомобілів, коефіцієнт використання вантажності. Постійними в моделюванні приймались такі величини, як допустимий максимальний термін доставки вантажів, обсяг споживання готової продукції, найкоротші маршрути руху АТЗ.

В алгоритмі ІМ закладено такі правила та закономірності. По-перше, якщо термін доставки вантажів до конкретного споживача перевищує допустимий, то цей споживач з маршруту виключається тільки тоді, якщо інші заходи (зміна кільцевого маршруту на декілька маятникових, зменшення одноразового гурту доставки вантажів) не дають бажаного результату. По-друге, для впорядкування ТП використано евристичний принцип впорядкування, який в даному сенсі полягає в тому, що постачання продукції споживачами виконується в порядку збільшення їх віддаленості від місця виготовлення [208]. По-третє, допускається як часткове задоволення попиту споживачів, так і часткове завантаження автотранспорту. В результаті отримано кусково-неперервні залежності необхідної кількості АТЗ на розвізних і маятникових маршрутах від обсягу виробництва і збуту (рис. 2.24-2.27). Лише деякі значення цих залежностей збігаються з результатами розрахунку за традиційними методами [124]. Це стосується мінімальних тактів кожного неперервного інтервалу. В усіх інших випадках спостерігаються вказані вище їх недоліки. Із усіх залежностей видно, що найбільш гнучкими стосовно обсягів виробництва, доставки і збуту продукції є транспортні процеси, в яких використовуються АТЗ фактичної вантажомісткості k_2=20 транспортних пакетів. Вантаж може доставлятись у таких схемах без перевищення дозволеного часу (рис. 2.20). Формування вантажного гурту при маятникових маршрутах і вантажомісткості k_2=100, 120 пакетів є неможливим. Для кільцевого маршруту, або для схеми з двома кільцевими маршрутами (рис. 2.21) характерно, що для одного і того ж значення такту τ_1 можна вибрати різні ТТС з різними за вантажомісткістю АТЗ.

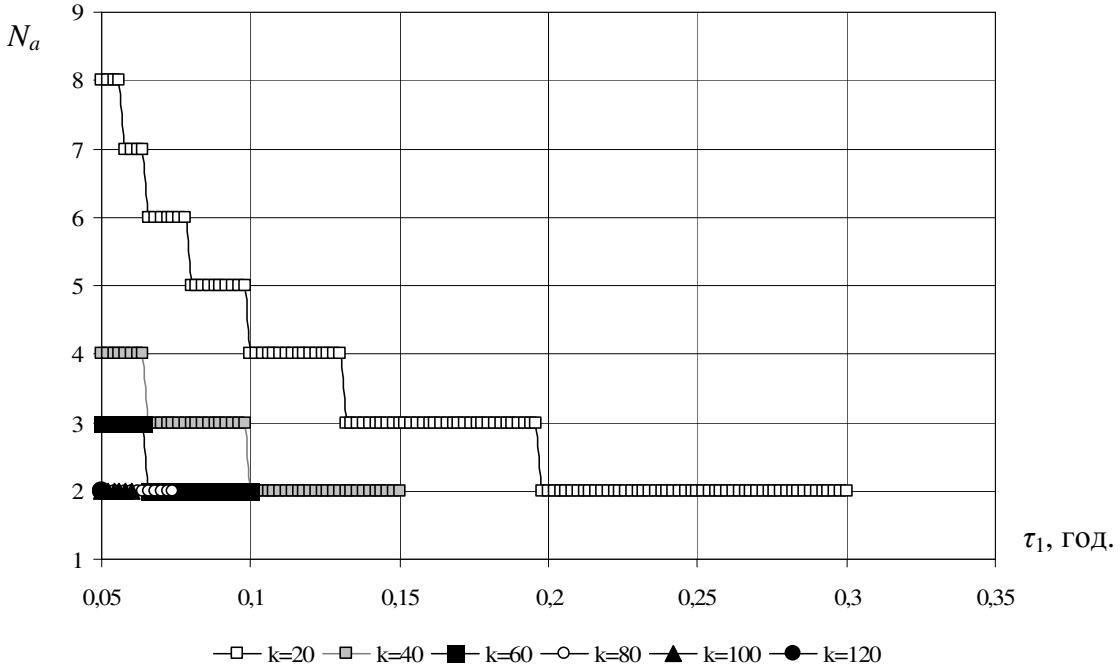


Рисунок 2.20 – Залежність необхідної кількості автомобілів N_a від такту τ циклічного ТП при різних розмірах транспортного гурту вантажів на єдиному кільцевому маршруті

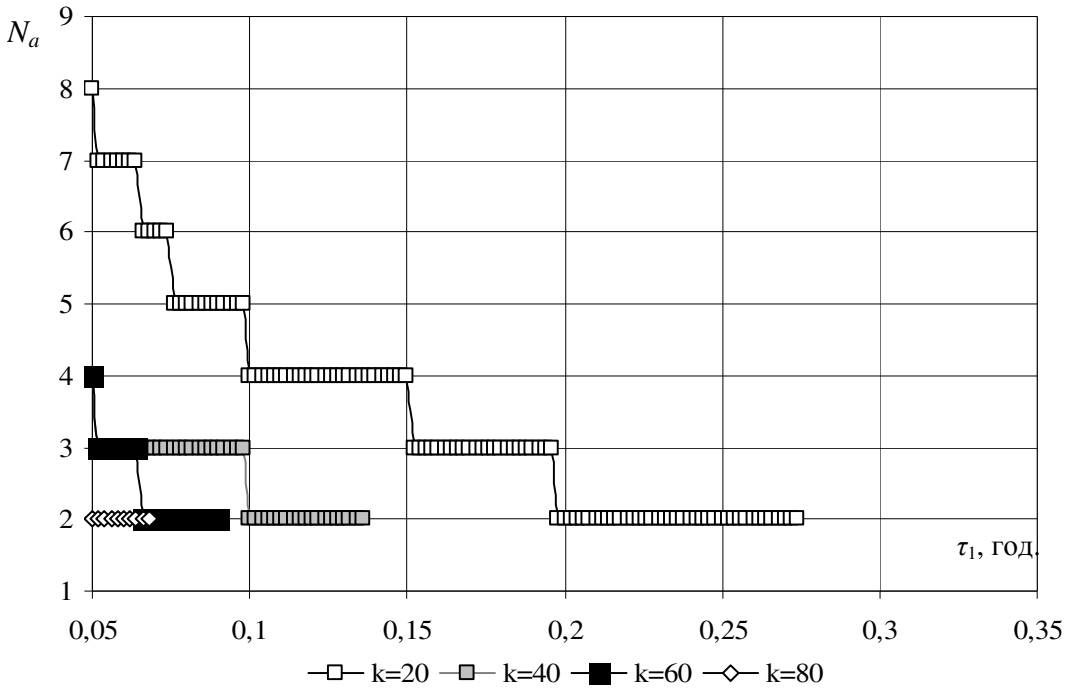


Рисунок 2.21 – Залежність необхідної кількості автомобілів N_a від такту ТП τ при різних розмірах гурту вантажів на двох кільцевих маршрутах

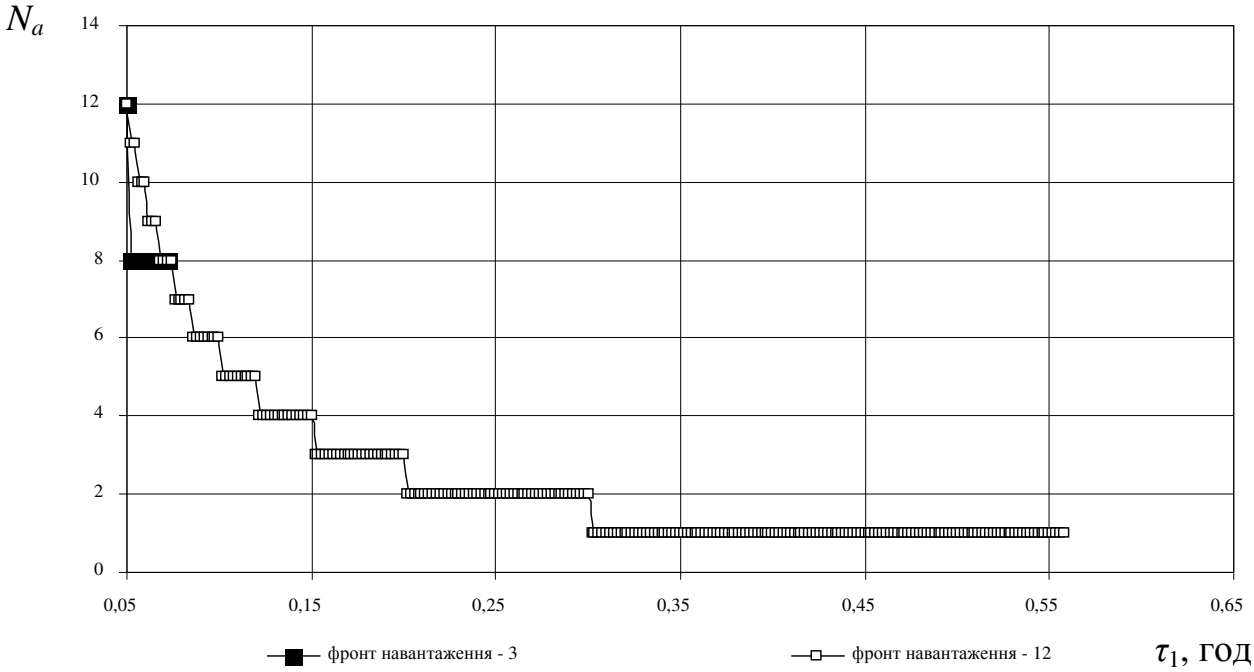


Рис. 2.22. Залежність необхідної кількості автомобілів N_a від такту виробничого процесу τ при різній кількості фронтів навантаження

Так, для такту τ_1=0,1 год. можна вибрати такі варіанти ТТС: 1 кільцевий, на якому працюють 4 АТЗ вантажністю 20 пакетів, або 2 АТЗ вантажністю 40 пакетів, або 2 АТЗ вантажністю 60 пакетів; 2 кільцевих, на яких працюють 4 АТЗ вантажністю 20 пакетів, або 2 АТЗ вантажністю 40 пакетів. Маятникові маршрути при такому такті є можливі лише тоді, коли є не менш, як 12 постів завантаження АТЗ, працює 5 автомобілів кожен з яких має вантажність 20 пакетів. Як видно з наведеного прикладу такі варіанти відрізнятимуться іншими показниками, наприклад максимальною тривалістю доставки (рис. 2.22). Отримана залежність від τ_1 показує, що функція $T_d(\tau_1)$ є кусково-неперервною. Для різних типів ТТС (різних маршрутів і вантажностей АТЗ) вона має розриви при одних і тих самих значеннях такту. Ці значення можна назвати *критичними*, оскільки при їх досягненні потрібно змінювати тип ТТС. Наприклад, користуючись залежністю на рис. 2.23, при такті $0,5<\tau_1<0,65$ год. найбільш раціональною за критерієм тривалості є ТТС з двома кільцевими маршрутами на яких працюють 3 АТЗ вантажністю 40 пакетів. А уже в межах такту $0,65 < \tau_1 < 1,00$ потрібно обирати ТТС з одним кі-

льцевим маршрутом, на якому працюватимуть 6 або 5 (залежно від конкретних значень такту) АТЗ вантажністю 20 пакетів.

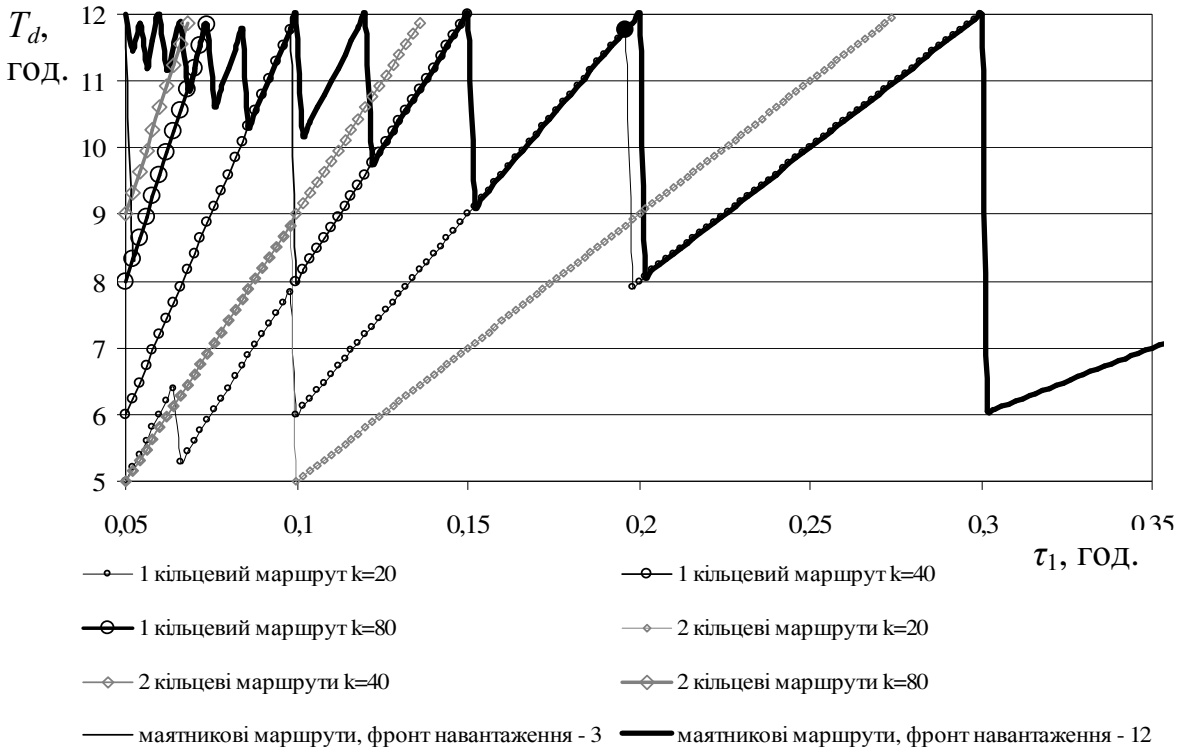


Рисунок 2.23 – Залежність тривалості доставки вантажу T_d від такту ТП τ для різних ТТС

Після такту $1{,}0<\tau_1$ ця ТТС стає уже неефективною. Таким чином потрібну кількість АТЗ потрібно вибирати разом із типом ТТС доставки для інтервалів τ_1, що відповідають його критичним значенням. В результаті моделювання отримано також залежності організаційних параметрів процесу виконання процесу доставки вантажів при наявності одного навантажувального засобу від сумарного вантажопотоку (рис. 2.24-2.25). На рис. 2.24 показано, що сумарні затримки процесу мають як декілька раціональних, так і декілька нераціональних відмін. Наприклад, найменші сумарні затримки у діапазоні, що досліджувався, спостерігаються на рівні 0,77 год. при інтенсивності 4,8 пакетів за годину. У той самий час, уже при інтенсивності 5,2 пакетів/год. затримки процесу зростають більш як втричі. До розміру вантажопотоку, що не перевищує 1,8 пакетів/год. транспортні системи є взагалі нераціональними, бо навіть в найсприятливішому випадку непродуктивні простої ресурсів у них перевищують 2,7 год. на один такт роботи транспортного пункту.

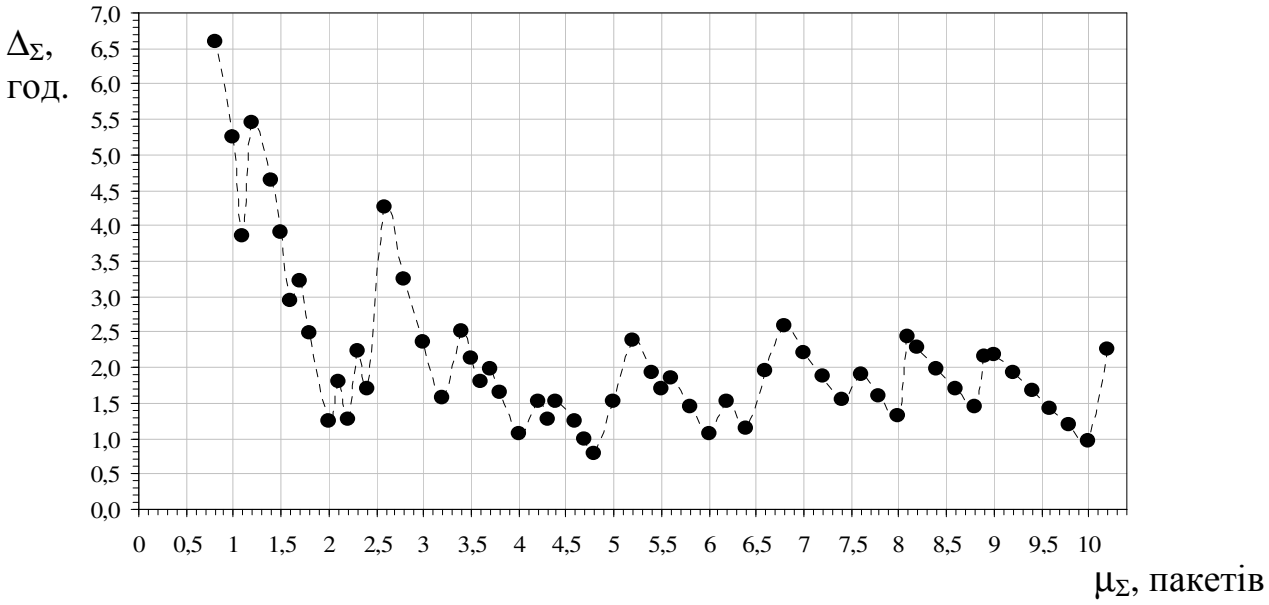


Рисунок 2.24 – Залежність сумарних затримок доставки вантажу від інтенсивності вантажопотоку

На рис. 2.25 подано фактичну вантажність автомобілів на трьох різних за тривалістю поїздки маршрутах. При невеликих обсягах матеріальних потоків оптимальними процеси є ті, при яких завантаження мінімальне.

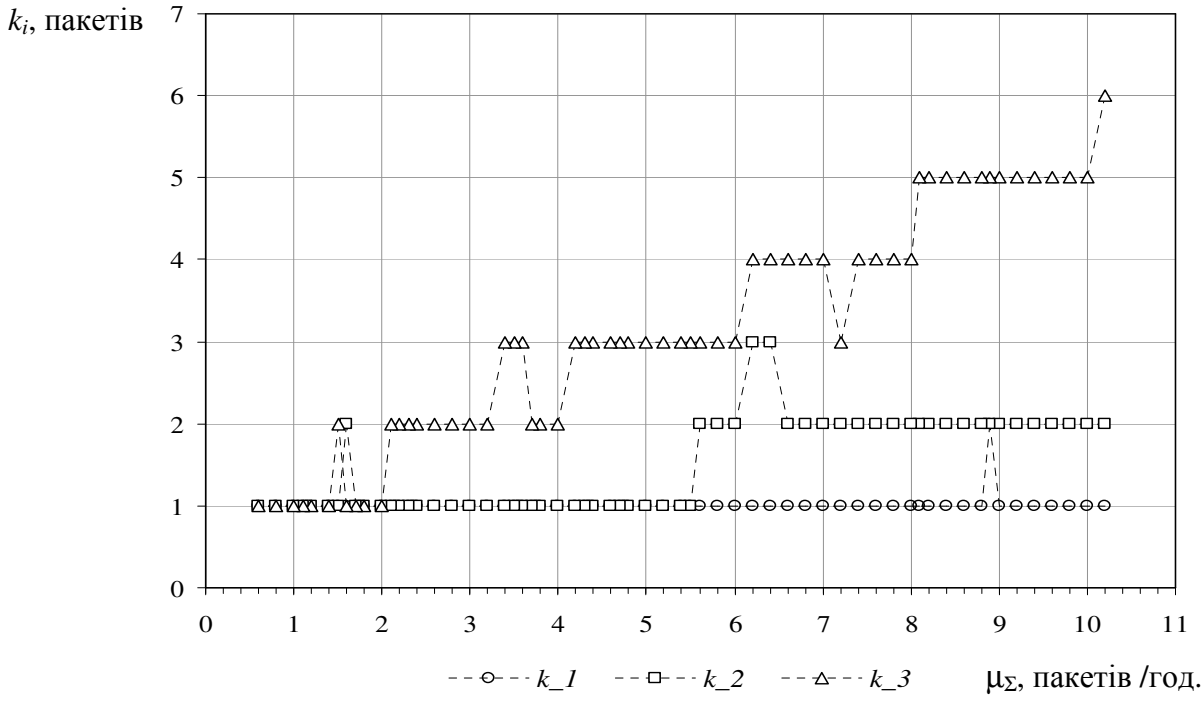


Рисунок. 2.25 – Залежність кількості завантажених пакетів від інтенсивності вантажопотоку

Навіть при інтенсивності 4,8 пакетів/год., коли сумарні затримки є мінімальними, отримуємо директиву завантажувати автомобілі на перший та другий маршрути – по одному пакету, і лише на третій маршрут – 3 пакети. Збільшення кількості пакетів на одному автомобілі дає змогу зменшити такт руху автомобілів на маршруті, але не зменшує простоїв в черзі до завантаження. Фронт зайнятих на маршрутах автомобілів прямо впливає на витрати по здійсненні перевезень. Проте, як видно з рис. 2.29, він зростає нелінійно із збільшенням вантажопотоків. Крім того, для оптимальних ТП характерно, що автомобілі використовуються у них найбільш інтенсивно. Із збільшенням вантажопотоків ТП стають більш стабільними щодо фронту автомобілів, що може свідчити про їх вищу продуктивність. Проте, фронт АТЗ у транспортних циклах, які пов'язані бодай однією операцією навантаження і їх необхідна кількість – не однакові величини.

Користуючись описаною методикою оптимізації розкладів взаємодії автомобілів в транспортному пункті, можна побудувати параметричний ряд оптимальних ТП, які характеризуються мінімальними сумарними затримками доставки вантажів (табл. 2.4). З таблиці можна вибрати параметри ТП, задаючись сумарним вантажопотоком μ_Σ, який вони обслуговують. При цьому можна вибрати необхідну кількість АТЗ з раціональною номінальною вантажомісткістю.

Таблиця 2.4 – Параметричні ряди оптимальних транспортних процесів

μ_Σ	t_n	k_1	k_2	k_3	$\tau_{1\text{-}2}$	f_n	f_1	f_2	f_3	τ_{m1}	τ_{m2}	τ_{m3}	Δ_n	Δ_m	Δ_Σ
10	0,5	1	2	5	0,22	3	4	5	5	0,5	0,67	1,00	0,64	0,33	0,97
8,8	0,5	1	2	5	0,25	2	4	4	5	0,57	0,76	1,14	0,46	0,99	1,44
8	0,4	1	2	4	0,26	2	4	4	5	0,63	0,83	1,00	0,48	0,83	1,31
6,4	0,4	1	3	4	0,37	2	3	2	4	0,78	1,56	1,25	0,69	0,47	1,15
6	0,3	1	2	3	0,32	1	3	3	5	0,83	1,11	1,00	0,22	0,83	1,06
4,8	0,3	1	1	3	0,31	1	2	5	4	1,0	0,70	1,30	0,21	0,56	0,77
4	0,2	1	1	2	0,33	1	2	4	5	1,25	0,83	1,00	0,23	0,83	1,06
3,2	0,2	1	1	2	0,42	1	2	3	4	1,56	1,04	1,25	0,32	1,25	1,56
2	0,1	1	1	1	0,50	1	1	2	5	2,5	1,67	1,00	0,40	0,83	1,23

Кожна зі схем є компромісним рішенням стосовно ритмічності навантажувальних і транспортних операцій. Так, якщо фактична вантажність автомобілів має бути великою, то зростають втрати часу на маршрутах, що компенсується більш щільним графіком під навантаженням. Можливі і обернені ситуації. З таблиці також видно, що наявність постів підпору в пункті навантаження не є негативним фактором при формуванні продуктивності АТЗ. Простій автомобіля на такому пості компенсується тим, що такт навантаження при цьому узгоджується з тактом випуску і рухом автомобілів на маршрутах. Такі ситуації характерні для великих за розміром вантажопотоків. На практиці можна застосовувати дублювання оптимальних ТП для того, щоб обробляти ще більші вантажопотоки.

На рис. 2.26 показано відкоректований графік навантаження і роботи автомобілів та одного навантажувального пристрою при обслуговуванні трьох маршрутів на МТМ з сумарною інтенсивністю 4,8 пакетів/год. Сумарний фронт автомобілів на маршрутах – 11, проте автомобіль № 1 виконує два цикли на різних маршрутах. Крім того розрахунковий такт руху автомобілів не строго дотримується, що не суперечить розрахункам сумарних затримок.

Оптимізація розкладу взаємодії навантажувальних і автотранспортних засобів у ТП, у яких відбувається циклічне розділення, злиття матеріальних потоків за критерієм мінімальних сумарних затримок процесу полягає в тому, що розв’язується суперечність між нерівномірністю тривалості відповідних операцій, тактом навантаження і тактом відправлення і руху транспортних засобів. Вона вирішується підбором оптимального розміру гурту вантажів до відправки. Таких значень в діапазоні вантажопотоків, які обслуговує транспортний пункт може бути декілька. Тому існує параметричний ряд оптимальних розкладів цих операцій.

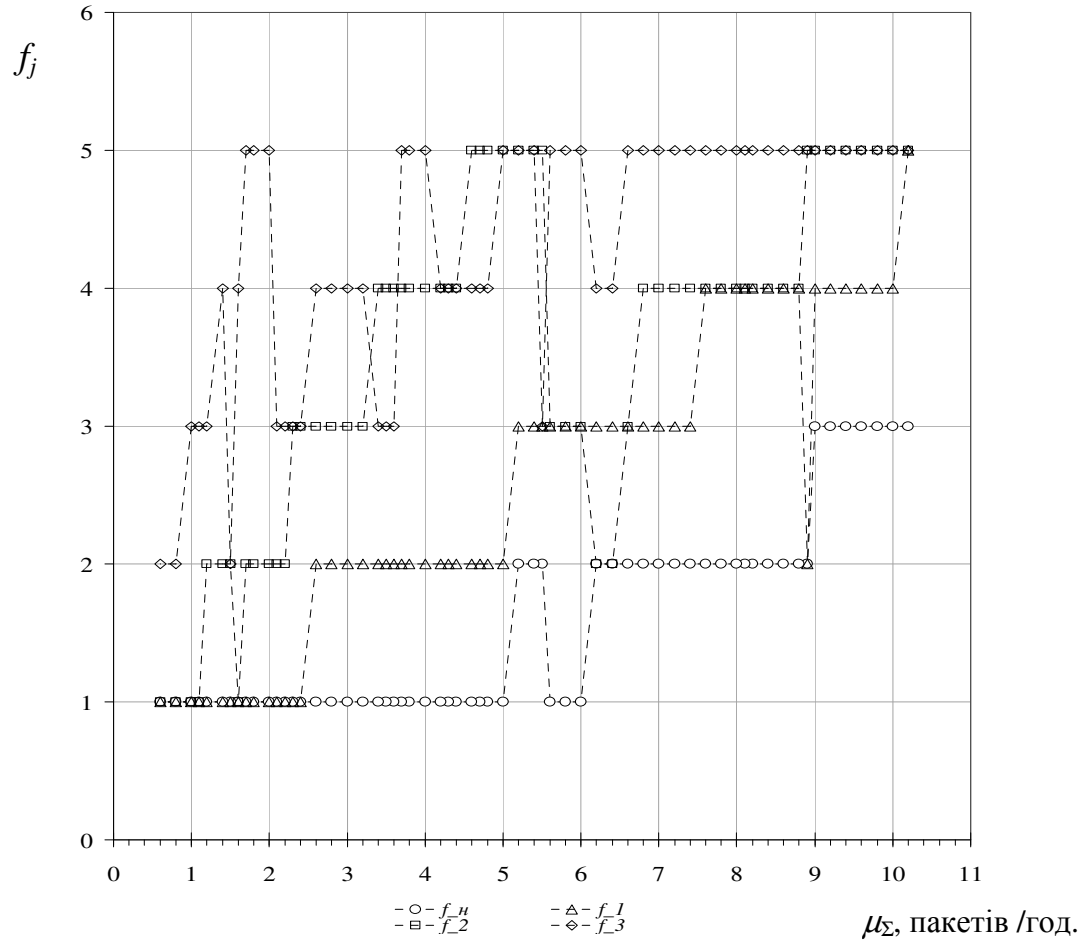
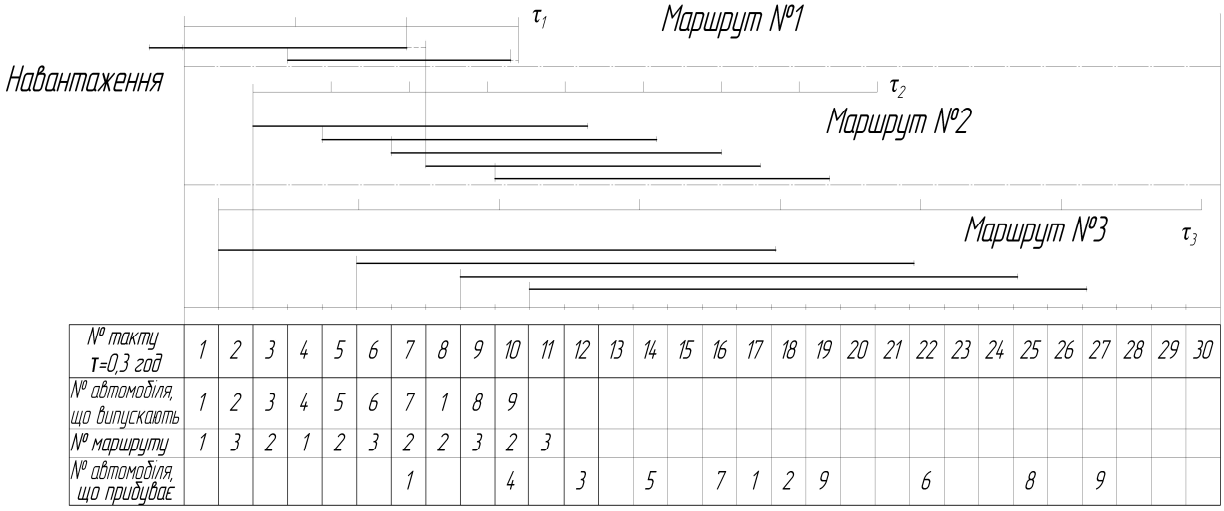


Рисунок 2.26 – Залежність фронту автомобілів на маршрутах і під завантаженням від інтенсивності вантажопотокv



№ такту τ=0,3 год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
№ автомобіля, що випускають	1	2	3	4	5	6	7	1	8	9																				
№ маршруту	1	3	2	1	2	3	2	2	3	2	3																			
№ автомобіля, що прибуває							1			4		3		5		7	1	2	9			6			8		9			

Рисунок 2.27 – Оптимальний графік навантаження і руху автомобілів при обробці сумарного вантажопотоку інтенсивністю 4,8 пакетів/год.

2.5. Висновки за розділом 2

1. В результаті виконаних теоретичних досліджень було доведено необхідність встановлення закономірностей вхідних потоків замовлень на перевезення вантажів з допомогою імітаційного моделювання.

2. Набір правил, який найбільш точно відображає зміст бажаних наслідків виконання міжміських вантажних перевезень можна звести до того, що у роботі кожного АТЗ мають бути цикли, які відповідають періоду коливань вхідного потоку. Однак, розмір періоду не впливає на точність імітації ТП міжміських перевезень вантажів.

3. Перевізнику не слід цілком уникати порожніх і нульових пробігів у транспортних циклах, адже завдяки наявності таких, і стохастичній природі надходження замовлень можна зменшити непродуктивний простій АТЗ, та суттєво зменшити кількість відмовлених замовлень. Якщо періодичність надходження замовлень є фіксованою, а її інтервал є пропорційний тривалості виконання замовлення, то кількість відмов і тривалість простоїв при цьому є мінімальними, однак і коефіцієнт використання АТЗ також знижується.

4. Враховуючи результати ІМ, можна стверджувати, що найбільш суттєвим для оцінювання діяльності АТП на міжміських маршрутах є показник кількості замовлень в розрізі тих, що надійшли, відмовлені й виконані. Для тих варіантів розподілу АТЗ по наявних замовленнях, де кількість відмов є мінімальною, усі інші експлуатаційні показники – також оптимальні.

5. Враховуючи особливості розвитку сучасних магістральних ТП, одним з шляхів вирішення проблем недовикористання провізних можливостей і затримок вантажопотоків, що виникають у зв’язку з ускладненням ТТС, є оперативне керування парком АТЗ. Інформаційна система для такого керування потребує створення ідеалізованої детермінованої моделі, яка розкриває співвідношення між елементарними логістичним операціями і вказує на ті фіксовані моменти часу, в які необхідно мати інформацію про матеріальні потоки на МТМ.

6. Враховуючи властивості ЕЛО, та їх взаємозв’язок, можна будь-яку циклічну ТТС подати у вигляді множини взаємопов’язаних операцій. При цьому детермінований зв’язок встановлюється між будь-якими двома ЕЛО в усьому процесі. Задаючись певними критеріями та обмеженнями, можна знайти оптимальний варіант ТП.

7. Використання послуг логістичного центру при доставці вантажів є вигідним за критерієм логістичних витрат, лише при оптимальному співвідношенні процесів нагромадження і перерозподілу матеріальних потоків при заданому рівні концентрації логістичних операцій. Існує лише скінченна кількість оптимальних поєднань різновидів процесів.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [6, 7, 10, 11, 37, 14, 21, 22, 23, 25, 45, 34, 35, 48].

РОЗДІЛ 3

УЗГОДЖЕННЯ МАТЕРІАЛЬНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У МАГІСТРАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ

3.1 Динаміка вантажопотоків і джерела інформаційних повідомлень в циклічних транспортних процесах

Виконання ТП, особливо тих де використовується автомобільний, залізничний транспорт, – це їх циклічне пристосування до умов матеріального виробництва і споживання, які утворюють дискретні матеріальні потоки [191]. Відбувається вона на основі змін в структурі ТП. Отже, виконання логістичних операцій є джерелом інформаційних потоків на МТМ. Зі збільшенням їх інтенсивності структура ТП стає складнішою. ЛЛ таких операцій є, тепер переважно, розгалуженими. Різна за величиною тривалість операцій, їх структура, та випадковий характер зумовлюють наявність непродуктивних станів ТП – затримок матеріальних потоків. Отже, існують такі послідовності операцій, при яких сумарна кількість небажаних станів буде мінімальною.

Визначимо пристосованість ТП доставки вантажів до зміни параметрів вхідних МП, пов'язаної із коливаннями попиту на продукцію, що постачається із врахуванням відомого прогнозу. На рис. 3.1 показано модель типової ТТС доставки вантажів від виробника *B*, магістральним перевезенням, до розподільчого пункту *Pn* і до споживачів *C*. Кожна ЕЛО оцінюється трьома параметрами: тривалістю t_i, тактом τ_i, розміром гурту k_i, фронтом f_i. Інтенсивність МП на кожній *i*-й послідовній ЕЛО, у зв'язку з прийнятим принципом його нерозривності, є сталою і визначається за виразом (2.1). Якщо попит на продукцію у споживача збільшується, то інтенсивність матеріальних потоків в ТП повинна зрости. Однак, це може успішно відбутися за двох умов. Перша: до виробника *B* потрібно вчасно подати інформацію (на рис. 3.1 інформаційний потік показано штриховою лінією). Час випередження подачі інформації – співставний з тривалістю логістичного ланцюга:

$$t_в = \tau_4 \cdot f_2 + \tau_4 + \tau_3 + \tau_3 \cdot f_1 + \tau_3 + \tau_2, \qquad (3.1)$$

де такт кожної i+1-ї ЕЛО прискорення/сповільнення визначають за виразом:

$$\tau_{i+1} = \frac{k_{i+1}}{k_i}\tau_i, \tag{3.2}$$

а фронт автомобілів на маршрутах – за виразом:

$$f_i = \left[\frac{t_{m.i}}{\tau_i}\right], \tag{3.3}$$

де $t_{m.i}$ – математичне сподівання тривалості руху на i-му маршруті; вираз, взятий в квадратні дужки, округлюють до цілого.

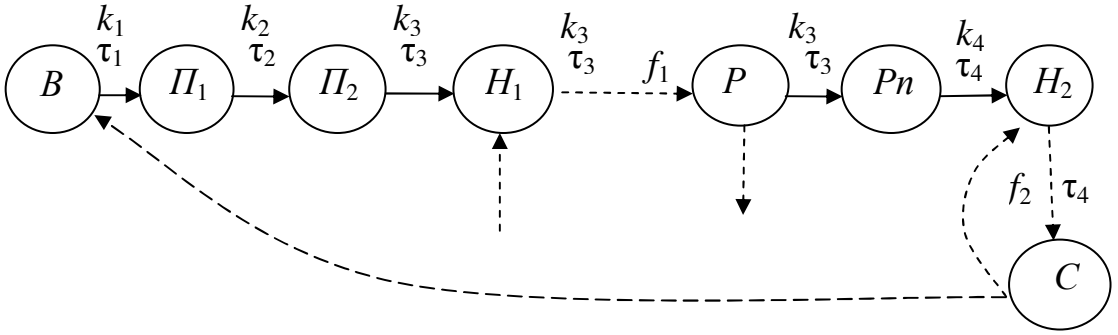


Рисунок 3.1 – ТТС доставки вантажів: B – виробництво, $П_1$ – пакування продукції в споживчий пакет; $П_2$ – пакування продукції в транспортний пакет, H_1 – навантаження на магістральний автопоїзд, P – розвантаження, Pn – розподіл пакетів за напрямками, H_2 – навантаження на маловантажний автомобіль, C – споживач; $\tau_1 \ldots \tau_4$ – такт ЕЛО, $k_1 \ldots k_4$ – розмір гурту вантажів, f_1, f_2 – фронти автотранспортних засобів на маршрутах

З врахуванням виразів (3.2) і (3.3), при сталих значеннях розмірів транспортних і споживчих пакетів, обсягу завантаження АТЗ, вираз (3.1) перепишемо у вигляді:

$$t_в = \frac{1}{\mu}\left(\left(f_1+1\right)k_4 + \left(f_2+1\right)k_3 + k_2\right). \tag{3.4}$$

Залежність необхідного часу для задоволення попиту від інтенсивності матеріального потоку заданої ТТС подано на рис. 3.2

На рис. 3.2 подано три залежності для трьох моделей ТП: ТТС №1, модель якої подана на рис. 1; ТТС №2, яка за своїми функціями відповідає ТТС №1, але має вкорочену структуру: у неї відсутній розподільчий центр Pn, а доставку вантажів споживачам виконують великовантажним магістральним

автопотягом; ТТС №3 – аналогічна *ТТС* №2, але перевезення виконуються маловантажним АТЗ.

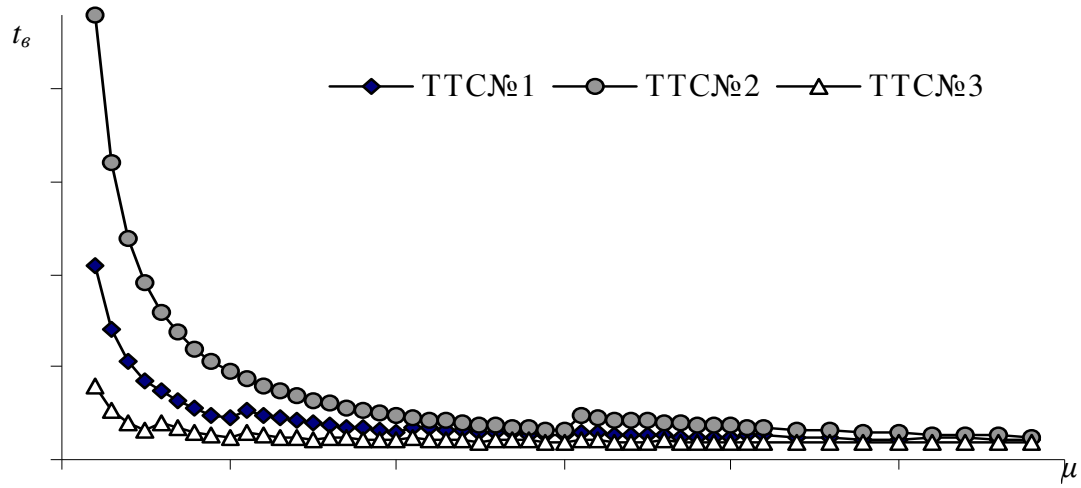


Рисунок 3.2 – Залежність необхідного випередження часу для прогнозування попиту на продукцію від інтенсивності матеріального потоку і структури ТТС, що його забезпечує

Як видно з рис. 3.2, отримані залежності є кусково-неперервними. Чим більший *горизонт прогнозування* (час прогнозованого періоду), тим більш коштів він потребує [123, 152]. З іншого боку, горизонт прогнозування опосередковано впливає на обсяг необхідної інформації для керування транспортною системою в цілому [188, 312]. Цей час є надто важливим для тих транспортних процесів, які характеризуються великою інтенсивністю МП (малий такт потоку). Однак ця важливість послаблюється, якщо ТП отримує меншу залежність від складування продукції та вантажів і більшу, – якщо його ЛЛ вкорочується. Друга умова збільшення інтенсивності МП при зростанні попиту – це успішна адаптація ТП до нових вимог – придатність його структури до оперативної перебудови. Цю властивість було досліджено на такому прикладі. Допустимо, що в *i*-й момент часу виробником *B* (див. рис. 3.1) була прийнята інформація про необхідність збільшити інтенсивність МП μ на величину $\Delta\mu$. Без порушення технології він може це зробити на чинних виробничих потужностях зменшенням такту випуску τ_1. Однак наступна фаза ТП – ЕЛО пакування $П_1$, яку позначимо *i*+1, яка до такого імпульсу потоку, як і наступні фази ТТС, не пристосована. Тому частина продукції залишиться на

складах виробника незапакованою. Це показано на рис. 3.3 введенням додаткової ЕЛО $СК_1$ – складування.

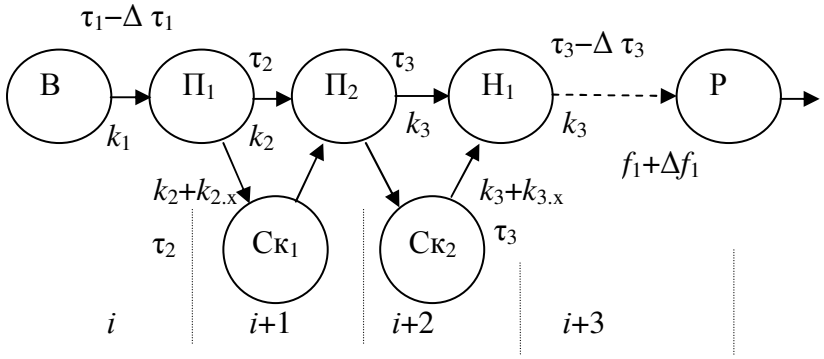


Рисунок 3.3 – Фрагмент ТТС при збільшенні матеріалопотоку на Δμ

Як бачимо, введення $СК_1$ супроводжується додатковими затримками частини МП на один такт τ_2. Наступна i+2 фаза характеризується таким ж імпульсом і, відповідно, необхідністю нового складування та новою затримкою τ_3. Під час операції транспортування резервування вантажів є неможливим, тому має відбутися прискорення потоку на величину $\tau_3 - \Delta\tau_3$ використанням додатко залучених АТЗ. Фронт їх збільшиться на Δf_1. Отже, в такій ТТС пульсація МП витримується шляхом: а) складування продукції/вантажів; б) залученням додаткових засобів. Випадок (а) характеризується затримками потоку, (б) – прискореннями. Сумарні затримки при додатному $\Delta\mu$ припадають тільки на частину МП. Тому для оцінювання ступеню адаптації ТП до нових умов доцільно використовувати питомі затримки у переміщенні продукції на їх фізичну одиницю:

$$\Delta_k = \frac{\tau_2}{k_{2x}} + \frac{\tau_3}{k_{3x}} - \frac{\Delta\tau_3}{k_3} + \frac{\tau_3}{k_{3x}} + \frac{\tau_4}{k_{4x}}. \qquad (3.5)$$

Якщо $\Delta\mu$ є від'ємним, тобто інтенсивність МП зменшується, то така "хвиля" вздовж ЛЛ вирівнюється тимчасовим зменшенням гурту матеріальних елементів: розмірів транспортних і споживчих пакетів, ступенем завантаження АТЗ. Це приводить до таких наслідків: з одного боку, прискорюється МП за рахунок зменшення обсягу запасів пакетів на складах. З іншого – МП сповільнюється, за рахунок зменшення фронту АТЗ на транспортуванні. Зменшення розмірів пакетів також приводить до порушення технології тран-

спортних операцій, як наслідок – здорожчання доставки. З використанням виразів (3.2 – 3.5) можна показати, що співвідношення такту виробництва до і після зниження інтенсивності МП в ТП є пов'язаним зі співвідношенням розмірів пакетів:

$$\frac{\tau_1}{\tau_{1.1}} = 1 - \frac{\Delta k}{k_2}. \tag{3.6}$$

У скільки разів збільшується вхідний такт, у стільки ж зменшується розмір гурту продукції в споживчому/транспортному пакеті.

3.2 Аналіз та впорядкування інформаційних потоків

В сучасних транспортних процесах інформаційні потоки відіграють ключову роль. Це підтверджено низкою публікацій, наприклад, [299, 312, 314, 316]. Доведено, що синергетичний ефект великої ТС, який характерний, наприклад, для логістичних центрів – наслідок централізації та концентрації операцій інформаційно-аналітичного характеру [87]. Проте, зовсім мало праць, де такий ефект знайшов відображення в моделях і був відтворений за різних умов перебігу.

Увесь обсяг телеметричних сигналів, який надходить до водія/екіпажу вантажного АТЗ при виконанні ним транспортного завдання можна умовно поділити на чотири категорії, у вигляді дискретних повідомлень: I_1 – про власні поточні координати, швидкість, отриманий від automatic vehicle location (автоматичне позиціонування транспортного засобу (AVL)); I_2 – про транспортні умови (параметри – фазова транспортного потоку, інтенсивність та інші), отриманий, наприклад, від Automotive Short Range Radar (портативний радар ближньої дії (SRR)), або від диспетчерських центрів стільникового зв'язку; I_3 – про вірогідні затримки в пункті призначення; I_4 – про дорожні умови (коефіцієнт зчеплення, мікро- і макронерівності тощо) отримана, наприклад шляхом порівняння повідомлень типу I_1 з системи глобального позиціонування (Global Positioning System (GPS)) та з бортових вимірювальних систем. Повідомлення I_1-I_4 можуть надходити в дискретно-квантованому ви-

ді, незалежними потоками. Але впливати на прийняття рішень вони можуть по-різному. Розв'язувались такі задачі:

1) дослідити вплив параметрів потоків повідомлень I_1, I_2, I_3 на вірогідність прийняття оптимальних рішень;

2) встановити граничні моменти надходження повідомлень з врахуванням вірогідності прийняття за ними оптимальних рішень стосовно виконання маршрутних завдань.

При розв'язанні цих задач прийнято такі допущення. По-перше, кількість інформації, що містися в повідомленнях, обчислювалась за [319]:

$$I = 0{,}5\log_2\left(1+\frac{\sigma_\lambda^2}{\sigma_\varepsilon^2}\right), \tag{3.7}$$

де σ_λ – дисперсія телеметрично виміряного параметра; σ_ε – дисперсія похибки його вимірювання.

Цей вираз стосується повідомлень усіх 4-х категорій, оскільки усі вони побудовані на неперервних сигналах. Формула (3.7) застосована з гіпотезою, що апріорний і апостеріорний розподіл сигналу, що передається підпорядковується одному і тому ж закону (ентропійний коефіцієнт – сталий). За формулою (3.7) виходить, що повної відсутності інформації про телеметричний параметр бути не може, оскільки максимальне значення σ_ε – скінчене. Отже, якщо $\sigma_\varepsilon \cong \sigma_{\varepsilon\max}$, то вживатимемо термін *мінімальна доступна інформація.* Подібно до того, повної наявної інформації також не існує, оскільки $\sigma_\varepsilon > 0$. Тому вживатимемо термін *максимальна доступна інформація* в заданих умовах її отримання.

По-друге, вважалося, що повідомлення I_4 в повному обсязі надійшли ще до початку руху АТЗ, таким чином ідеалізований ТП для умов руху по магістральній заміській дорозі є сформований апріорі.

По-третє, приймалося, що брак максимальної інформації, яка міститься в отриманих повідомленнях I_2, I_3 при виборі параметрів ТП можна компенсувати прямо пропорційним запасом часу.

Четверте допущення полягало в тому, що будь-яке за обсягом і категорією повідомлення I_2 та I_3 можна отримати в будь-який момент виконання маршрутного завдання.

Взаємодію потоків інформації показано на прикладі типового елементарного транспортного завдання на МТМ. Нехай вантажному АТЗ потрібно, завантаживши у пункті А в момент часу t_0, доставити вантаж в пункт Б і розвантажитись не пізніше моменту t_{11} (рис. 3.4).

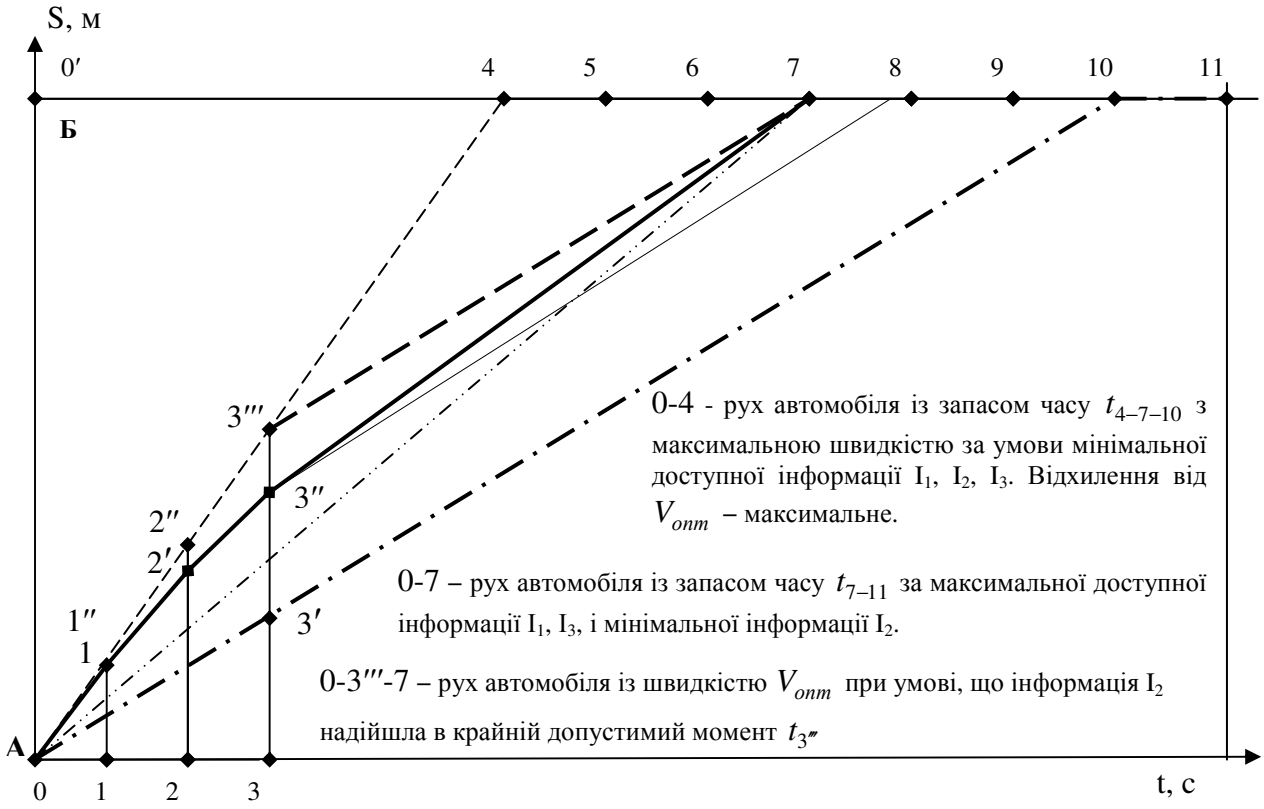


Рисунок 3.4 – Графіки руху АТЗ за наявності максимальної доступної інформації I_3 і різних способах отримання інформації I_2

Дорожні умови на маршруті АБ – відомі. Знаючи їх, водій /екіпаж АТЗ може виконати ТП з оптимальними параметрами (наприклад, за витратами палива), що включає вибір середньої швидкості руху – $V_{опт}$. В кінцевому пункті Б для розвантаження прибувають інші АТЗ. Оскільки моменти їх прибуття і тривалість обслуговування – випадкові величини, то до розвантаження може утворюватись черга. Користуючись виконаними раніше дослідженнями, без суттєвих обмежень можна прийняти, що процес розвантаження в

пункті Б являє собою СМО типу M/G/m, де M – вхідний потік, що підпорядковується показниковому закону, G – процес обслуговування з розподілом тривалості загального виду, m – кількість розвантажувальних пристроїв (фронт розвантаження) [206]. Якщо відомі інтенсивність прибуття АТЗ в пункт Б, та інтенсивність їх обслуговування, то можна обчислити середню сподівану тривалість простою АТЗ в черзі $t_ч$. Враховуючи це, ТП можна скоректувати так, що момент прибуття t_{10} враховуватиме середній гарантований час затримки в доставці вантажу $t_{10} - t_{11}$. Таким чином сформульовано ідеальний образ виконання ТП за умови максимальної доступної інформації I_2 та I_3 (штрих-пунктирна лінія). Передбачалося, що повідомлення I_1, I_2, I_3 періодично надходять до екіпажу АТЗ і цю періодичність, а також обсяг повідомлень можна змінювати з довільним, необхідним інтервалом. Відповідно, обсяг повідомлень може бути змінним. Якщо в *i*-й момент часу, $t_o < t_i < t_{11}$, згідно з черговим повідомленням типу I_1, АТЗ має координату x_i, то, залежно від кількості інформації в отриманих повідомленнях I_1 та I_3, він має рухатись з середньою за часом швидкістю $V_e \geq V_{опт}$, яка визначається за формулою:

$$V_e = \left(x_{11} - x_i\right) \Big/ \left(T_{опт} + \Delta t_i\right), \text{ м/с}, \tag{3.8}$$

$$\text{де} \quad \Delta t_i = \Delta t_{i1} + \Delta t_{i2} \geq T_з, \text{ с}, \tag{3.9}$$

де $T_{опт}$ – оптимальна тривалість процесу доставки при швидкості $V_{опт}$ (за відсутності перешкод з боку транспортного потоку і черг до розвантаження), $\Delta t_{i1}, \Delta t_{i2}$ – запас часу на, відповідно, затримки в русі і в черзі в кінцевому пункті Б; $T_з$ – загальні ймовірні затримки у доставці вантажу, визначені за наявною інформацією.

Зменшувати швидкість нижче $V_{опт}$ є, згідно з умовами, недоцільно.

Для розрахунку дійсної середньої швидкості АТЗ на магістральній дорозі використано макроскопічну модель транспортного потоку Прігожина, що виведена з мікроскопічної з врахуванням поправок Павері-Фонтана [320]:

$$V_e = V_б - V_{вим} = V_б - \left(1 - p\right)\tau\rho\Theta, \text{ м/с}, \tag{3.10}$$

де $V_б$ – середня бажана швидкість; $V_{вим}$ – вимушена під впливом потоку зміна бажаної швидкості; p – ймовірність обгону; τ – тривалість релаксації ТП в результаті випадкових збурень; Θ – варіація швидкостей.

Значення p і τ не залежать від індивідуальних швидкостей автомобілів у маневрі, а від щільності ρ і середньої швидкості v в місці обгону, тобто $p = F_1(v,\rho)$, $\tau = F_2(v,\rho)$. З кожним повідомленням типу I_2 нагромаджується інформація про зміни у фазовій густині транспортного потоку, тобто про область значень функції $f(x,v,t)$. При цьому розширюється область визначення по x і по t. Максимально доступною є інформація по області $x \in (x_A, x_Б)$, де x_A, $x_Б$ – координати початкового і кінцевого пунктів маршруту. Згідно з даними про апостеріорну фазову густину яку можна було б визначити в момент часу t_i обчислено значення апріорних величин для заданої координати x в момент часу $t_j > t_i$:

- щільності транспортного потоку

$$\rho(x,t) = \int_0^\infty f(x,v,t)\,dv, \tag{3.11}$$

- середньої швидкості АТЗ у транспортному потоці

$$V(x,t) = \frac{1}{\rho(x,t)} \int_0^\infty v f(x,v,t)\,dv, \tag{3.12}$$

- варіації швидкостей транспортних засобів

$$\Theta(x,t) = \frac{1}{\rho(x,t)} \int_0^\infty (v - V)^2 f(x,v,t)\,dv, \tag{3.13}$$

Дослідження проводились у два етапи. На першому приймалось, що екіпаж АТЗ має мінімальний доступний обсяг інформації за повідомленнями типу I_3 (рис. 3.5). Інформація I_1 та I_2 подавалась трьома різними способами:

- на початку руху, одноразово, в повному доступному обсязі;
- під час руху, у крайній щодо ефективності прийнятого рішення момент, в повному обсязі;

- під час руху, багатократно, рівними обсягами через однакові інтервали часу. На другому етапі приймалося, що інформація I_1-I_3 надходить до екіпажу АТЗ синхронно з однаковим обсягом за однакові інтервали часу (рис 3.5).

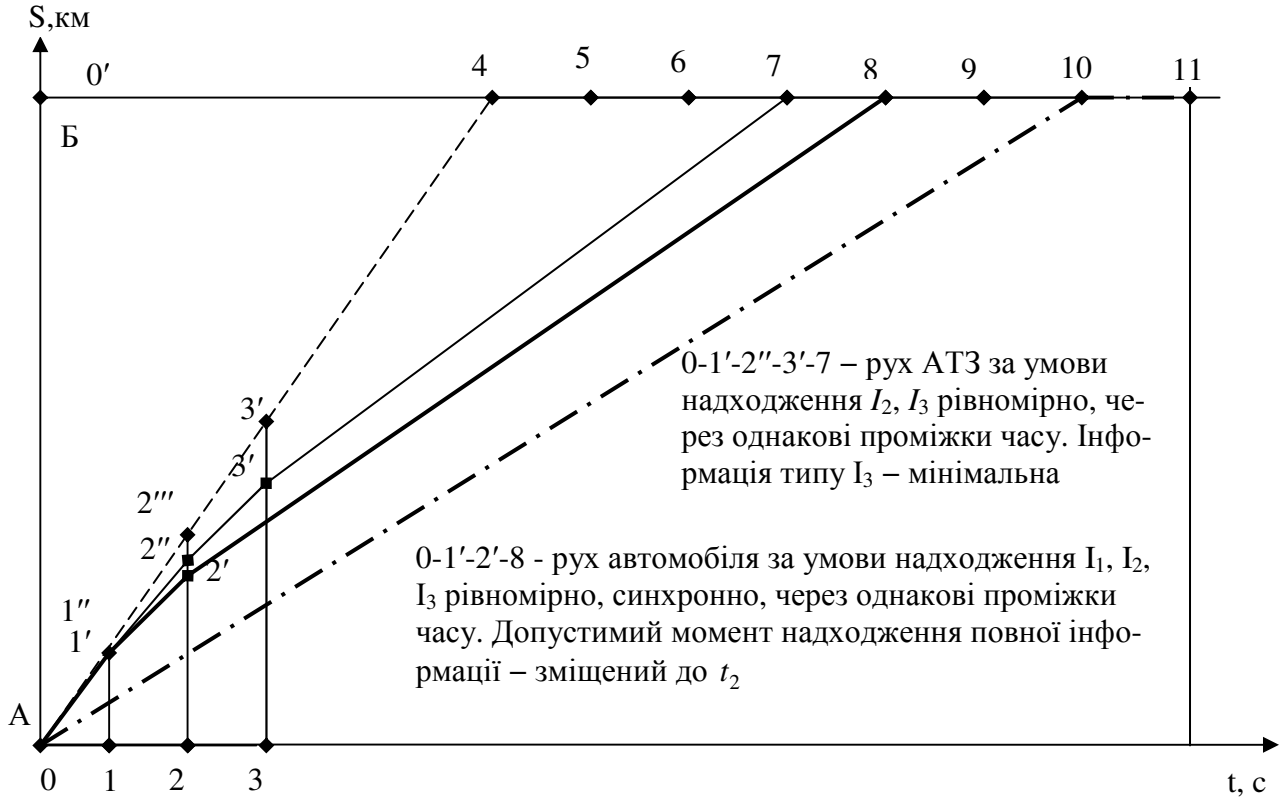


Рисунок 3.5 – Графіки руху АТЗ, якщо повідомлення I_1, I_2 I_3 – синхронні

При фактичній наявності лише одного інформаційного потоку I_2 (див. рис. 3.4) запас часу Δt_{i2} – максимальний і тому екіпаж АТЗ зорієнтований на момент прибуття в пункт Б – t_7. Максимальне сумарне відхилення від оптимальної програми руху буде тоді, коли максимальна доступна інформація I_2 буде подана на початку руху t_0. Це пов'язано з тим що транспортний потік навіть в першому наближенні не можна назвати стаціонарним. Отже значення функції $f(v,x,t)$ не можна екстраполювати більш, ніж на $t > t_0 + \tau$, де τ – період дискретизації повідомлень I_2. Отже, рішення про вибір $V_б$ не будуть адекватними. Значить, існує момент часу після якого, АТЗ, рухаючись, до того ж, з мінімальною інформацією I_2, отримавши її, не може ефективно використати (крапка 3‴). Цей момент названо *граничним щодо прийняття рішення*. Пізніше від граничного моменту не доцільно також отримувати інфо-

рмацію I_2 квантами, хоча цей спосіб отримання приносить в сумі найменші відхилення від $V_{опт}$. Якщо синхронно подаються повідомлення I_2 та I_3, то це впливає не тільки на відхилення від оптимального режиму і момент прибуття в кінцевий пункт, а й зсуває граничний момент прийняття рішення у більш ранішні терміни (див. рис. 3.5).

3.3 Методика оцінювання стабільності транспортних процесів за умов змінних матеріальних потоків

Важливість інформаційного забезпечення ТП зростає особливо при функціонуванні ЛЛ постачання вантажів, саме як змінних МП. Саме тоді наявні повідомлення використовуються для пристосування ТП до нових умов, тобто для стабілізації бізнес-процесів. Для того, щоб усі ЛЛ, що перетинаються, функціонували ефективніше, потрібно знати закони їх перетворення в зовнішньому середовищі [203]. Крім того, необхідно враховувати дискретний характер ТП, який складається із структурних і параметричних модулів. Виконано дослідження перехідних процесів, які відбуваються в ТТС при зміні попиту, на товари, що поставляються на МТМ, а також зміні умов постачання та інших випадкових зовнішніх впливах. Для максимального скорочення затримок матеріального потоку у ТП, який зазнає випадкових зовнішніх впливів був використаний принцип неперервності потоку [305]. Так якщо початкові ЕЛО у ТП характеризуються значеннями вхідних тактів $\tau_{вх.i}$, то усі наступні є функціонально залежними від них. Відповідні залежності зберігаються так, як і в стаціонарних матеріальних потоках. Тривалість *j*-ї ЕЛО повинна бути $t_j \le \tau_i$, де i – номер попередньої ЕЛО. Якщо це співвідношення не зберігається, то значення фронту *j*-ї ЕЛО має збільшитися за виразом:

$$f_i = \left\lceil \frac{t_i}{\tau_i} \right\rceil, \qquad (3.14)$$

де f_i – фронт технічних засобів для виконання ЕЛО.

Якщо дві сусідні ЕЛО мають неузгоджені режими, то у виконанні принаймні одної з них виникатиме затримка. Статична затримка кожної ЕЛО може бути обчислена за формулою:

$$Z_i = \left(f_i \cdot \tau_i - t_i \right) \cdot f_i . \qquad (3.15)$$

Простий лінійний ЛЛ, який, наприклад, складається з ЕЛО: 1 – виготовлення, 2 – пакóвання 3 – навантаження і транспортування; 4 – розвантаження і розпакування; 5 – споживання (рис. 3.6), матиме статичні затримки, якщо режими його операцій будуть неузгодженими (не кратними такту). Кожна ЕЛО цьому ланцюзі характеризується чотирма параметрами τ_i , k_i, f_i, t_i.

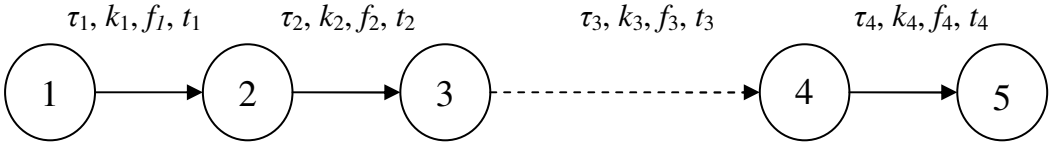


Рисунок 3.6 – Схема моделі лементарного логістичного ланцюга

Оскільки параметри сусідніх ЕЛО є залежними, то справедливі вирази:

$$\tau_4 = \frac{k_4}{k_3}\tau_3 ,\ \tau_2 = \tau_3 ;\ \tau_2 = \frac{k_2}{k_1}\tau_1 ;\ f_3 = \left[\frac{t_3}{\tau_3} \right] \geq 1 ;\ f_1 = f_2 = f_4 = 1 . \qquad (3.16)$$

Завдяки їм, ми можемо отримати: $\tau_4 = \frac{k_4}{k_1}\tau_1$. Таким чином, лінійний ЛЛ призводить до лінійної залежності його параметрів. Значення критерію може бути обчислене за формулою:

$$Z_\Sigma = \sum_{i=1}^{4} \left(f_i \tau_i - t_i \right). \qquad (3.17)$$

Сумарні затримки процесу доставки вантажів є *статичними*, тобто вони повторюватимуться від циклу до циклу, якщо не змінюватиметься інтенсивність та режими МП. Як показує вираз (3.17), ці затримки залежать від початкового такту і від величин $k_1 \ldots k_4$ (рис. 3.7).

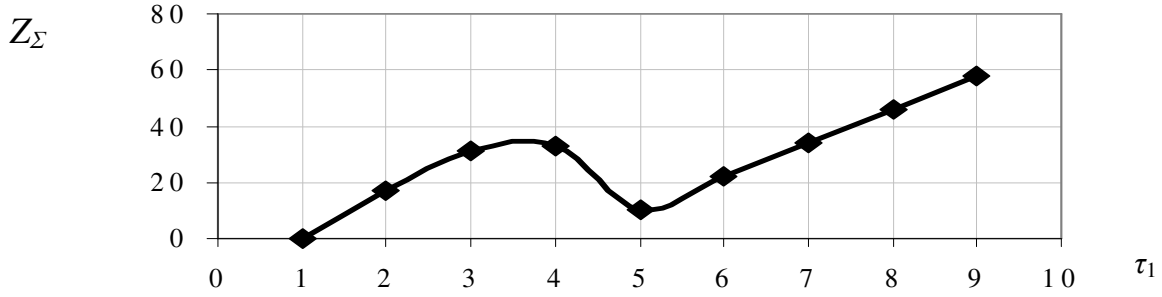


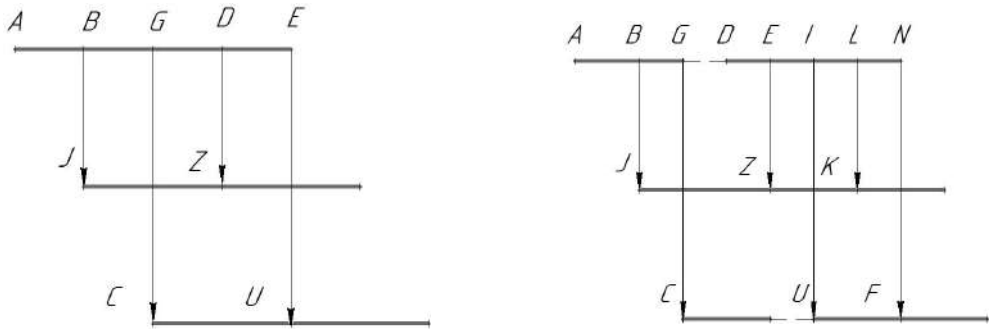
Рисунок 3.7 – Залежність статичних затримок доставки від такту вхідного МП

Досконаліть побудованого ЛЛ залежить від раціонального підбору параметрів у виразі (3.17). При зміні попиту на постачання вантажів вхідний такт цього ЛЛ змінюватиметься:

$$\tau_1^{j+1} = \tau_1^j \pm \Delta\tau_1, \qquad (3.18)$$

де j – індекс наступної фази ТП.

Знак при величині $\Delta\tau_1$ залежить від виду зміни МП. Якщо обсяг споживання зростає, то вхідний такт ЛЛ зменшується і навпаки. Залежно від величини $\Delta\tau_1$ в ЛЛ можуть відбуватись певні зміни, які приводять до утворення *динамічних затримок* процесу [310]. Ці затримки є також причиною неузгодженості сусідніх ЕЛО, однак вони мають здатність зникати, коли МП в ЛЛ стабілізується. Це можна продемонструвати з допомогою циклограми операцій (рис. 3.8). Стаціонарний потік – у двох сусідніх ЕЛО №1 і № 2. Відрізки *ABGDE* – це послідовність вхідних ЕЛО №1 із сталим тактом τ_1=15 хв. Під час ЕЛО №2 розмір гурту матеріальних елементів подвоюється, тобто $k_2 = 2k_1$. Отже такт наступної ЕЛО №2 також подвоюється і дорівнює $\tau_2 = 30$ хв. Таку зміну показано з допомогою двох ланцюгів операцій: *JZ* і *CU*, відповідно до кратності змін потоку, які відбулися в ЕЛО №2. Затримки в такому ЛЛ є статичними. Вони виникають через те, що тривалість ЕЛО є меншою, ніж тривалість такту, впродовж якого вона виконується.



а *б*

Рисунок 3.8 – Циклограми операцій №1, №2 доставки вантажу: а) при стаціонарному потоці; б) при збільшенні інтенсивності МП

На рис 3.8 б показано, що інтенсивність МП збільшується. Такт вхідної операції ЕЛО №1 спочатку дорівнював $\tau_1 = 15$ хв. Потім він зменшився до $\tau_1 = 10$ хв., що видно по довжині відрізка *BG*. ТТС залишається незмінною. Тому такт ЕЛО №2 також зростає вдвічі. Він набуває значення τ_2=20 хв., що видно по довжині відрізка *CU*. Проте, операції, які мають різний такт, опиняються в одному ЛЛ після настання змін. Це призводить до вимушених динамічних затримок процесу, які на рис. 3.8 б показано штриховими лініями *GD* і *UF*. Зрозуміло, що величина цих затримок залежить від зміни інтенсивності вхідного МП. Виконання ЕЛО №1, наприклад, затримується на величину ΔZ, яку можна визначити за виразом:

$$\Delta Z_1 = Z\left(\tau_1^{j+1}\right) - Z\left(\tau_1^{j}\right). \qquad (3.19)$$

На значення різниці (3.19) впливає не тільки абсолютна зміна такту $\Delta\tau_1$, а й кількість дискретних періодів, упродовж яких ця зміна відбувається. Завдання полягає в тому, щоб визначити таку послідовність величин $\Delta\tau_1^1, \Delta\tau_1^2, \ldots, \Delta\tau_1^j, \Delta\tau_1^{j+1}, \ldots, \Delta\tau_1^{j+n}$, при яких значення критерію Z_Σ є мінімальним. Для розв'язання такої задачі було використано методику кінцевих різницевих рівнянь [321]. Так сумарну затримку процесу при зміні вхідного такту $\Delta\tau_1$ за два кроки може бути записана як різницеве рівняння другого порядку:

$$\Delta^2 Z = Z\left(\tau_1^{j+2}\right) - 2Z\left(\tau_1^{j+1}\right) + Z\left(\tau_1^{j}\right), \qquad (3.20)$$

яке можна записати у вигляді:

$$Z(\tau_1) = \tau_1 \frac{k_4}{k_2} f_1 + 2\frac{k_2}{k_1} f_2 \cdot \tau_1 + \tau_1 f_1 - T\,, \tag{3.21}$$

де T – сумарна допустима тривалість операцій в ЛЛ, яка не залежить від їх послідовності виконання, та від інших організаційних параметрів.

Ввівши умовні позначення, рівняння (3.21) можна спростити:

$$Z(\tau_1) = A \cdot \tau_1 - T\,, \tag{3.22}$$

де A – константа. Аналогічно можна записати різницеві рівняння вищих порядків. У випадку, коли ЛЛ є розгалуженим, тобто має ЕЛО розподілу, або з'єднання МП, потрібно також знайти функцію вихідного такту найдовшого лінійного ЛЛ і різницеві рівняння записати саме для цієї функції [324].

Спростимо позначення $Z_\Sigma\left(\tau_1^j\right) = z_j$, маючи на увазі, що стан затримок матеріальних потоків залежить від вибраних констант A і від такту вхідного потоку τ_1. Різницеве рівняння другого порядку можна звести до вигляду:

$$a_1 z_{j-1} + a_2 z_{j-2} + a_0(j) = z_j\,,\ j = 0,1,\ldots n\,. \tag{3.23}$$

Його називають лінійним різницевим неоднорідним рівнянням [196]. Розв'язок однорідного рівняння:

$$a_1 D_{j-1} + a_2 D_{j-2} = D_j\,, \tag{3.24}$$

можна знайти у вигляді $z_j = \lambda^j$. Підставляючи z_j, $z_{j\text{-}1}=\lambda^{j-1}$, $z_{j\text{-}2}=\lambda^{j-2}$, у рівняння (3.23), отримаємо характеристичне рівняння для визначення λ:

$$P(\lambda) = \lambda^2 - a_1\lambda - a_2 = 0\,. \tag{3.25}$$

Його корені λ_1, λ_2 обчислимо з формули:

$$\lambda_{1,2} = \frac{a_1 \pm \sqrt{D}}{2}\,, \tag{3.26}$$

де $D = a_1^2 + 4a_2$.

У теорії різницевих рівнянь доводиться, що залежно від знаку дискримінанти D можливі такі три випадки [304].

1) $D > 0$. Тоді λ_1, λ_2 – дійсні і різні, і загальний розв'язок рівняння (3.25) знаходиться за формулою $\tau_j = A_1\lambda_1^t + A_2\lambda_2^t$, де A_1, A_2 – довільні сталі, які визначають з початкових умов: $\tau_{j=0} = A_1 + A_2$, $\tau_{j=1} = A_1\lambda_1 + A_2\lambda_2$.

2) $D = 0$. Тоді характеристичне рівняння має корені $\lambda_1=\lambda_2$, і загальний розв'язок (3.23) визначається за формулою: $\tau_j = (A_1 + A_2 \cdot j)\cdot\lambda_1^j$, а довільні сталі визначають з початкових умов, тобто для $\tau_{j=0} = A_1$, $\tau_{j=1} = \lambda(A_1 + A_2)$.

3) $D < 0$. Тоді λ_1, λ_2 – комплексні змінні $\lambda_{1,2} = \alpha \pm i\beta$, де $\alpha = \frac{a_1}{2}$, $\beta = \sqrt{-D}$, $i^2=-1$. Їх легше застосовувати в тригонометричної формі:

$$\lambda_{1,2} = \rho(\cos\omega \pm i\sin\omega),\ \rho = \sqrt{\alpha^2+\beta^2} = \sqrt{-a_2},\ tg\,\omega = \beta/\alpha \qquad (3.24)$$

Загальний розв'язок (3.23) задається:

$$\tau_j = \rho^j\left(B_1\cos\omega j + B_2\sin\omega j\right), \qquad (3.25)$$

де B_1, B_2 – довільні сталі, які визначаються з початкових умов.

Таким чином, при $D<0$ розв'язок різницевого рівняння (3.23) має характер коливань, амплітуда яких зростає, якщо $\rho > 0$ і згасає, якщо $\rho < 0$. Такі моделі динаміки ТП дають змогу з'ясувати, чи приведе зовнішнє збурення у ТП у вигляді зміни такту вхідного потоку до стабілізації, або ж динамічні затримки у зв'язку з цим будуть й надалі зростати від циклу до циклу. Наприклад, якщо загальний розв'язок різницевого рівняння має вигляд:

$$z_j = 2^{0,5j}\left(C_1\cos\alpha j + C_1\sin\beta j\right) + 1, \qquad (3.26)$$

то його частинний розв'язок залежить від початкових умов, тобто від такту τ_1^1 і від його зміни $\Delta\tau_1^1$. З рис. 3.9 видно, що процес зміни величини МП на $\Delta\tau_1^1$ приводить до дестабілізації ЛЛ, яка проявляється на вже на 3-му циклі і далі зростають. Сумарні затримки у цьому ТП виникають з двох причин. Статичні – їх видно на стадії j=0, – проявляються в результаті неузгодженості тактів сусідніх ЕЛО. Динамічні затримки у ТП коливаються в часі і, загалом, зростають. Для того, щоб зменшити коливання, потрібно змінювати структу-

ру ТП, або ж застосовувати початкове резервування МЕ для згладжування стрімких імпульсів вхідних потоків.

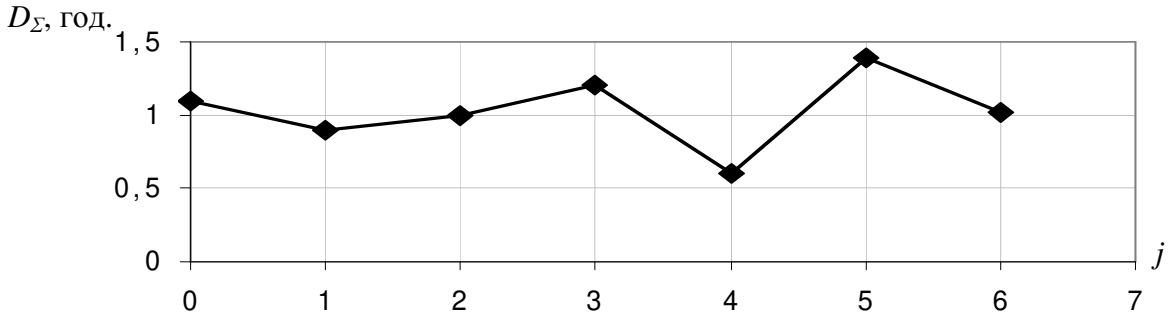


Рисунок 3.9 – Приклад нестабільного лінійного ТП: *j* – номер циклу ТП

Рівень досконалості ТП доставки вантажів на МТМ доцільно оцінювати за мінімумом сумарних затримок процесу: статичних і динамічних. Якщо загальний МП на МТМ є незмінним, то будуть мати місце лише статичні затримки. Вони зумовлені невідповідною кратністю такту і тривалості ЕЛО. Сумарні затримки не можна зменшити, якщо тільки підбрати відповідні параметри гурту *k* і такту τ. Динамічні затримки виникають в ЛЛ, якщо змінюється такт початкової ЕЛО. Отже необхідне додаткове регулювання вхідних потоків, яке полягає в їх стабілізації, наприклад використанням складів, або довгострокове прогнозування.

3.4 Стабілізація матеріальних потоків на магістральній транспортній мережі

Як було розглянуто вище, коливання МП приводить до виникнення додаткових затримок переміщення МЕ. Коливання МП можна згладити стабілізацією потоків, яку можна продемострувати на такому прикладі. Розглядався типовий ТП, що складається з ЛЛ міжміського постачання вантажів від виробника до регіональної мережі споживачів за потоковою технологією, що досліджена раніше: виробництво – пакування у споживчу тару – пакування в транспортні пакети – формування гурту відправлення – навантаження – розподіл за напрямками – доставка в розподільчий пункт – розподіл за споживачами – розвезення на кільцевих маршрутах [187]. Особливості моделі ТП стосовно МТМ, що досліджувалась: 1) є декілька джерел вантажопотоків –

декілька виробників; 2) мережа суб'єктів МТМ не обмежена у взаємозв'язках, зокрема немає обмежень щодо постачання вантажу від будь-якого виробника, чи від будь-якого розподільчого пункту; 3) кількість кінцевих споживачів у мережі збуту – скінченна, але не фіксована, тобто обсяг постачання вантажів – це функція, яка залежить від інтенсивності споживання товарів кожним споживачем μ_i та загальною кількістю взятих до обслуговування споживачів i=1…n. В моделі збережено принцип нерозривності циклічного МП: при фронті робіт f = 1 будь-яка i-та ЕЛО не може розпочатись, якщо не завершена попередня, а математичне сподівання її тривалості виконання t_i є не більшою, ніж показник ритмічності – такт τ. Цей показник є сталим, якщо МП не трансформується в розмірі дискретних гуртів – k, або якщо він не змінюється за середньою інтенсивністю, яку визначаємо за виразом (2.1). Загальна інтенсивність МП в мережі – це сума усіх потоків, що виходять з джерел, або ж сума усіх потоків, які доходять до споживачів (сумарний попит), незалежно від того в якій мірі розгалужена мережа і скільки у ній є кінцевих пунктів матеріальних потоків (споживачів C_i). Затримки в русі МЕ при сталому загальному потоці відбуваються в результаті неузгодженості величин t_i та τ_i. Відомо, що при сталому сумарному МП існує така ТТС, при якій неузгодженість більшості ЕЛО процесу, отже й затримки будуть мінімальними [187]. Якісні перетворення ТТС відбуваються при досягненні критичних значень такту вхідного потоку. Якщо вхідний потік у ТТС є змінним, то затримки потоку можуть відбуватись не тільки через некратність тактів і тривалостей ЕЛО, а й через неузгодженість сусідніх операцій у ЛЛ за абсолютною величиною такту. Детальніше покажемо утворення затримки потоку при зміні його інтенсивності на прикладі однієї елементарної операції №4 (рис. 3.8). На рис. 3.10 показано потоки, які зазнають перетворень в ЕЛО № 4, та сусідні з нею – №1 і №5, коли сумарний потік є сталим (μ_Σ=*const*). У цьому випадку зберігається співвідношення:

$$\mu_\Sigma = \frac{k_1}{\tau_{0-1}} = \frac{k_2}{\tau_{1-4}} = \frac{k_3}{\tau_{4-5}}, \qquad (3.27)$$

де μ_Σ – стала середня інтенсивність вхідного МП; k_1, k_2, k_3 – розміри гуртів МЕ, які, в загальному випадку, можуть бути різними; $\tau_{0\text{-}1}$, $\tau_{1\text{-}4}$, $\tau_{4\text{-}5}$ – такти відповідних ЕЛО. Нульова операція – це прибуття матеріального елемента до заданої ТТС.

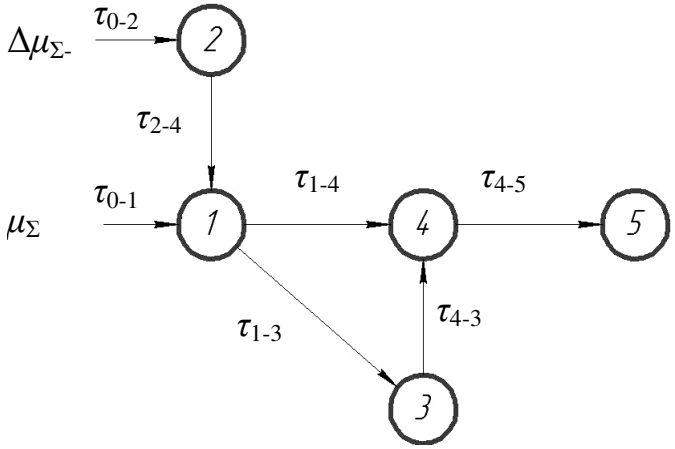


Рисунок 3.10 – Елементарний приклад змін в структурі і властивостях ЕЛО при зміні вхідного потоку: 1-5 ЕЛО

У ТТС виникають збурення, які передаються у вигляді додаткового вхідного потоку з інтенсивністю $\Delta\mu_\Sigma$, яка може бути додатною, або від'ємною (зменшення сумарного потоку). В попередніх публікаціях було показано, що додаткові потоки зумовлюють необхідність тимчасового резервування частини матеріальних елементів для вирівнювання пульсацій. У даному випадку таке резервування відображено у вигляді ЕЛО №2 – резерву вхідного потоку, який має місце, коли $\Delta\mu_\Sigma$ має знак «–», і ЕЛО №3, який характерний для випадку зростання вхідного потоку. При будь-якому значенні $\Delta\mu_\Sigma$ стабільність матеріальних потоків в ТП порушується, це потребує додаткових запасів потужностей і, водночас, приводить до затримок потоків (рис. 3.11). На рисунку показано приклад впливу збільшення вхідного МП на стабілізацію ТП. Для даного прикладу прийнято, що розміри гуртів матеріальних елементів не змінюються. Затримка потоку – це декілька тактів $\tau_{1\text{-}3}$ і $\tau_{3\text{-}4}$, які є переходами системи від початкового (він ж дорівнює вихідному $\tau_{4\text{-}5}$) такту $\tau_{0\text{-}1}$ = 15 хв. до 10 хв. Під час цієї затримки матеріальні потоки не здійснюють потрібних перетворень, а нагромаджуються в МТМ. Загальний період стабілізації потоку після його збурення у даній мережі складається з двох півперіодів: стабілізації

на вході й під час виконання, власне, ЕЛО №4. Такий приклад дає змогу зробити припущення про те, що шляхи стабілізації потоків слід шукати в структурі самого ТП.

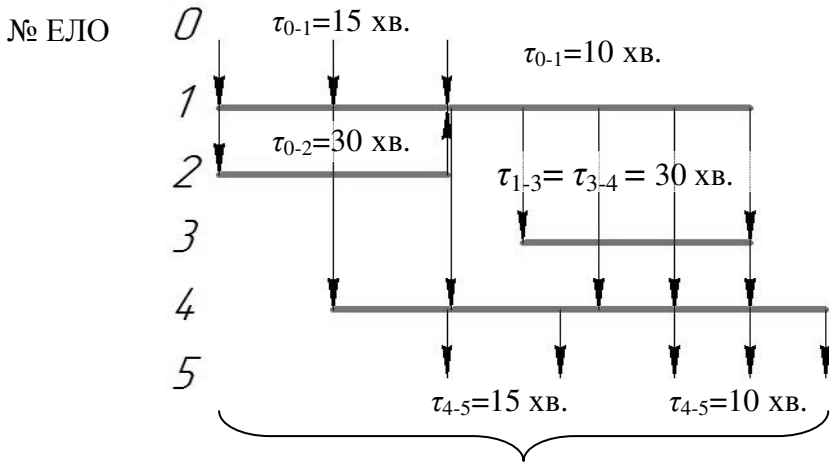


Рисунок 3.11 – Приклад циклограми ТП

Виходячи з попередніх міркувань, назвемо можливі шляхи стабілізації: 1) розгалуження ЛЛ по напрямках, кожен з яких має власні коливання інтенсивності потоків; 2) зміна довжини ЛЛ, з використанням операцій, які пов'язані з прискоренням / сповільненням потоків; 3) зміна кількості джерел потоків; 4) зміна кількості стоків. Зрозуміло також, що час стабілізації МП залежатиме від величини $\Delta\mu_{\Sigma}$, однак на практиці вона не піддається контролю. Дослідження проводились з виокремленням кожного окремого чинника, що впливає на затримки МП. Так, розгалуження ланцюгів постачання також розглянуто на елементарному прикладі (рис. 3.12). У ньому задано пункт прийому-перерозподілу потоків – ЕЛО №1 і скінченна кількість напрямків, у даному випадку – три. Після збільшення / зменшення інтенсивності матеріальних потоків утворюється додаткова вершина 2 графа, яка означає тимчасову затримку потоку внаслідок неготовності системи перелаштуватись на нове значення вхідного такту, а також вершини 3, 5, 7, що символізують ЕЛО тимчасової затримки потоку внаслідок неузгодженості його з попитом споживача, відповідно μ_1, μ_2, μ_3.

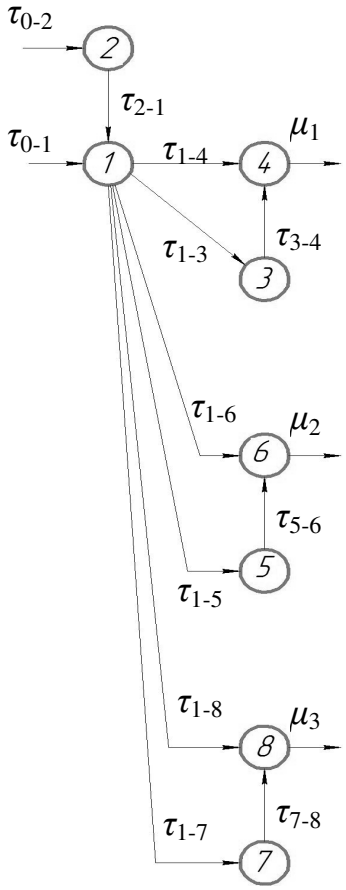


Рисунок 3.12 – До дослідження впливу розгалуженості ТТС на сукупні часові затримки

Припускалось, що розміри гуртів МЕ до і після перерозподілу не змінювались. До зміни МП в цій ТТС виконувалась рівність:

$$\frac{k}{\tau_{0-1}} = \frac{k}{\tau_{1-4}} + \frac{k}{\tau_{1-6}} + \frac{k}{\tau_{1-8}} = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 .$$

Нова рівність набуває вигляду:

$$\frac{k}{\tau_{0-1} \pm \Delta\tau_{0-1}} = \frac{k}{\tau_{1-4} \pm \Delta\tau_{1-4}} + \frac{k}{\tau_{1-6} \pm \Delta\tau_{1-6}} + \frac{k}{\tau_{1-8} \pm \Delta\tau_{1-8}} = \\ = (\mu_1 \pm \Delta\mu_1) + (\mu_2 \pm \Delta\mu_2) + (\mu_3 \pm \Delta\mu_3) \quad , \qquad (3.28)$$

де $\Delta\tau_i$ – зміна такту подачі МП внаслідок його нового перерозподілу; $\Delta\mu$ – зміна середньої інтенсивності МП внаслідок зміни попиту на товари.

Знак ± вказано з в рахуванням збільшення /зменшення сумарного МП. Права частина рівності (3.28) показує, що знаки ± при величинах $\Delta\mu$ можуть бути різними. Це означає, що функція ЕЛО №1 є не тільки розподільчою, а й стабілізаційною. Так, якщо зміна інтенсивності потоку за напрямом μ_1 є додатною, а μ_2 – від'ємною, то сумарна інтенсивність МП зміниться лише на

значення $\Delta\mu_\Sigma = \Delta\mu_1 - \Delta\mu_2 + \Delta\mu_3$, що є менше, ніж при тотальному зростанні попиту на усіх напрямках.

Допустимо також, що об'єднання таких потоків, зміна інтенсивності яких сукупно мінімізують загальне зростання μ_Σ може бути способом стабілізації коливань в ТП, оскільки при цьому зменшується потреба в значному резервуванні на ЕЛО №2. Однак, навіть при наявності незначного коливання вхідних та потоків між напрямками, виникають затримки часу переміщення продукції. Приклад таких затримок подано на циклограмі (рис. 3.13).

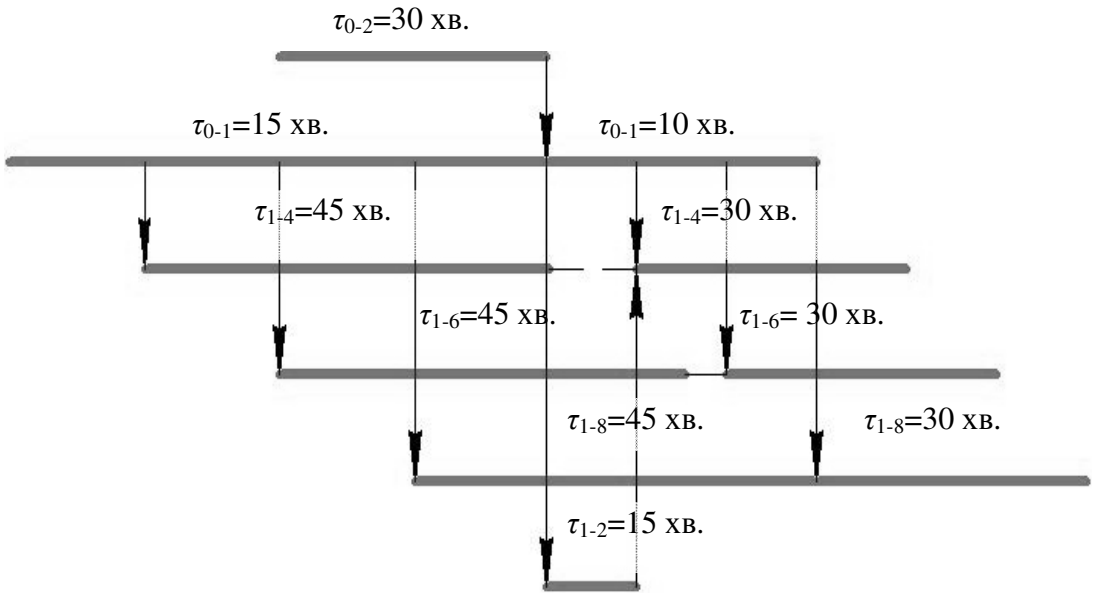


Рисунок 3.13 – Циклограма матеріальних потоків при їх розгалуженні і зміні середньої інтенсивності

На цьому прикладі на усіх трьох напрямках інтенсивності потоки зростають, що потребує додаткового потоку з тактом $\tau_{0\text{-}2}$=30 хв. В результаті вхідний такт $\tau_{0\text{-}2}$ зменшується до 10 хв., а усі три вихідні – до 30 хв. У зв'язку з тим, що їх попереднє значення було 45 хв., виникає неузгодження і розриви потоку. Також з'являється потреба додаткових запасів на стабілізацію виконання циклічного ТП. Проведено моделювання і побудовано залежність сукупних затримок від зміни інтенсивності потоку (рис. 3.14). При побудові даної залежності розглядався найпростіший випадок, при якому на усіх напрямках розгалуженого потоку його розмір збільшується пропорційно. Через це отримана залежність є лінійною.

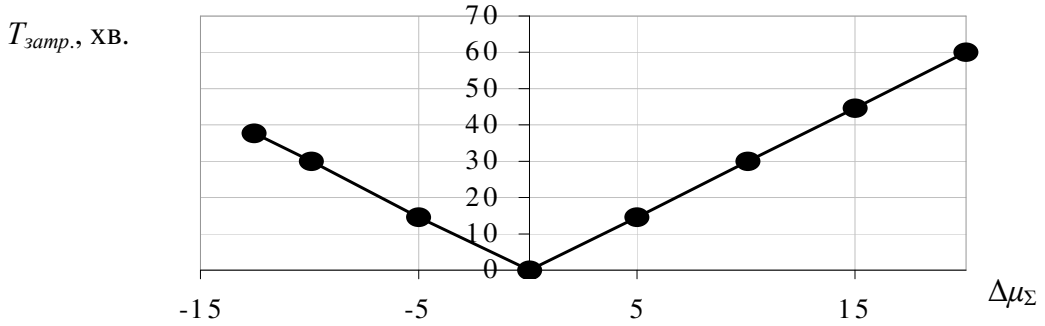


Рисунок 3.14 – Залежність сумарних часових затримок МП від зміни його сумарної інтенсивності

Можна припустити, що існує відповідна комбінація розподілених потоків, яка приводить до оптимального режиму стабілізації ТП, при якому сукупні затримки є мінімальними. Також було з'ясовано, що зростання / зменшення рівня розгалуженості ТП при сталому значенні сумарного вихідного потоку не впливає на сумарну тривалість затримок, якщо при цьому різні напрямки потоків не є однаковими за реакцією на збурення.

Під час досліджень впливу довжини ЛЛ на період стабілізації ТП та сумарні затримки в ньому взято до уваги відомі закономірності впливу розмірів гуртів матеріальних елементів на інтенсивність МП [188]. Так, якщо інтенсивність МП в лінійному ЛЛ (без розгалужень) зростатиме, то на кожній додатковій ЕЛО затримки часу додаватимуться до загальних. Однак, якщо при цьому можна збільшити швидкість потоку шляхом зменшення розміру гурту k_i на кожній i-й ЕЛО, без порушення транспортної технології, то додаткове складування вантажів буде непотрібне. Розглянемо вираз:

$$\mu_\Sigma + \Delta\mu = \frac{k_i}{\tau_i} + \frac{k_i}{\Delta\tau_i} = \frac{k_j}{\tau_i}, \qquad (3.29)$$

ліва частина якого показує збільшення інтенсивності МП в цілому, середня – демонструє, як можна стабілізувати ТП, використовуючи додаткову ЕЛО складування з тактом роботи $\Delta\tau_i$ при збільшенні потоку. Права частина (3.29) показує як, не збільшуючи запасів, уникнути затримок. Основна змінна тут – розмір гурту k_j. Однак, зменшення розмірів гурту МЕ негативно впливає на витрати ресурсів для їх переміщення. Тому величина k_j/k_i повинна мати об-

межене застосування в якості стабілізуючого фактора. Доцільніше виконувати стабілізацію з допомогою зміни гурту матеріальних елементів при більшій кількості послідовних ЕЛО в ЛЛ.

3.5 Висновки за розділом 3

1. Адаптація ТП до зміни інтенсивності МП приводить до затримок у ЛЛ. Збільшення інтенсивності МП на МТМ, де операції транспортування є найбільш тривалі, приводить до зменшення додаткових витрат часу.

2. При організації ТП за принципом «не пізніше визначеного терміну» з дотриманням оптимальних режимів руху необхідно обґрунтовано вибирати спосіб, кількість джерел та моменти отримання повідомлень про дорожні, транспортні умови руху та умови реалізації ТТС. Використання декількох незалежних інформаційних потоків, зменшує відхилення від оптимальної програми, з іншого – скорочує час на прийняття ефективних рішень.

3. При зміні (збільшенні чи зменшенні) інтенсивності вхідного циклічного МП, на МТМ функціонально виникає потреба в резервуванні. Також виникають затримки МП, пов’язані з неузгодженням параметрів ЕЛО.

4. Для стабілізації ТП з мінімальними втратами часу і коштів доцільно застосувати частковий та повний перерозподіл МП між напрямками і джерелами, а також змінні гурти матеріальних елементів.

5. Модель, що описує динаміку МП в лінійному ЛЛ адекватно подана у вигляді лінійного різницевого однорідного рівняння другого порядку. Його розв’язання показує шлях до стабілізації організаційних параметрів ТП.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [10, 11, 14, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 44, 45, 50, 54, 55, 56, 57,58].

РОЗДІЛ 4
МЕТОДОЛОГІЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ОПТИМАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕСУ

4.1 Загальна характеристика задач організації транспортних процесів

Пропонується удосконалений підхід до розуміння організації транспортних процесів на МТМ. Він базується на попередньо виконаному аналізі, з якого сформулюємо основні характеристики матеріальних та інформаційних потоків, взяті до уваги:

1) матеріальні потоки на МТМ – дискретні, тобто зміна їх часово-просторового протікання відбувається у фіксовані моменти; з цього випливає, що інформаційні повідомлення в ТП також можуть виникати у згадані моменти, отже й реакції на збурення також виникають у фіксовані моменти;

2) сучасні середні та великі ТС – інтегровані з джерелами і споживачами вантажопотоків; якщо в літературі донедавна під організацією доставки вантажів розумілось лише транспортна складова, тобто ТП [89, 124, 188], то тепер ЛЛ розглядають від виробництва до кінцевого споживача [189];

3) транспортні процеси на МТМ, враховуючи їх велику просторову розсередженість, є мультиагентними, тобто контроль процесів, які реалізуються на МТМ, а також рішення про реакцію на зовнішні збурення приймається не тільки центральним диспетчером (рис. 4.1), а й окремими агентами (АТЗ, експедиторами, логістами) внаслідок їх взаємодії і обміну інформацією (рис. 4.2); однак, цей принцип не є переважаючою тенденцією; інформаційні потоки мають створювати таку систему, в якій інформація б була сприятливим фактором самоорганізації ТП;

4) транспортні процеси на МТМ можна розглядати як циклічні, тобто їх кількісні характеристики змінюються періодично, незалежно від тривалості періоду [190], адже будь-який неперіодичний сигнал можна розглядати як періодичний, період зміни якого дорівнює нескінченності; стохастичні вхідні

потоки замовлень у МТМ розкладаються на простіші, які є квазіперіодичними;

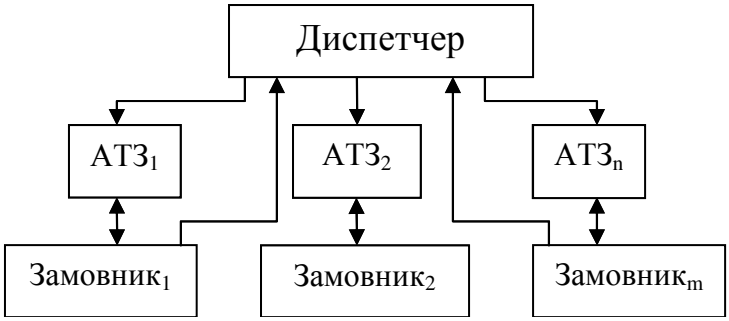


Рисунок 4.1 – Найбільш поширеніша схема інформаційних потоків в ТП при виконанні замовлень на перевезення на МТМ

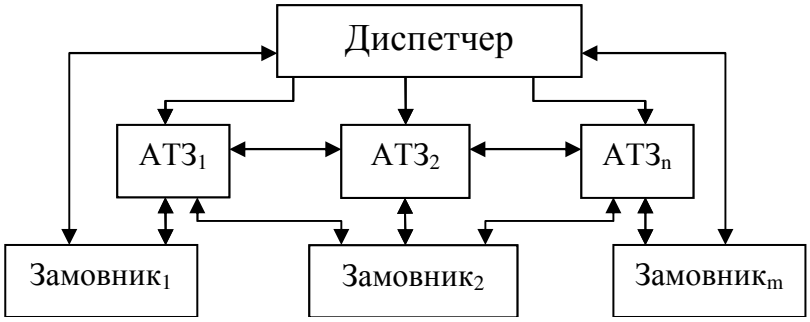


Рисунок 4.2 – Схема інформаційних потоків на МТМ при виконанні ТП

5) потік інформаційних повідомлень виникає в різних просторово-часових фазах ТП; також повідомлення, що виникли, можуть передаватись в різні точки МТМ і з різною швидкістю; таким чином, інформаційний потік в МТМ являється суперпозицією часткових потоків.

Організація матеріальних потоків на МТМ пов’язана з плануванням оперативним регулюванням, обліком, контролем та аналізом [188]. Кожна з цих функцій поділяється на завдання, а останні – на операції. Номенклатура і склад завдань по кожній функції управління також визначаються сутністю керованих потоків [191]. Організація дискретного процесу, яким є ТП, розглядалась як координація дій суб’єктів процесу (АТЗ, екіпажів АТЗ, диспетчерів, логістів, експедиторів) з використанням системи обробки інформації. Зміст організації полягає у встановленні часових і технічних регламентів виконання замовлень на вантажоперевезення. Ці регламенти формуються під впливом загальних принципів і правил, які називають стратегією підприємств. З іншого боку, враховуючи зміну умов виконання

замовлень, автомобільні перевізники корегують стратегії під впливом оперативних задач. Тому розглянемо задачі планування транспортних процесів, які можна поділити на чотири класи за методологією їх розв'язування:

1) часове впорядкування дій суб'єктів ТП на МТМ в цілому;

2) координація дій суб'єктів ТП у транспортних пунктах;

3) розподіл завдань між суб'єктами ТП на МТМ;

4) контроль швидкостей і тривалості руху АТЗ по МТМ.

МТМ характеризується значно більшою тривалістю їздок між транспортними пунктами, ніж операціями у цих транспортних пунктах. Тривалість їздок залежить від вибраних режимів руху (швидкості, завантаженості автопоїзда, місць і тривалості зупинок для відпочинку тощо). Однак, ці режими вибирають ще заздалегідь перед початком руху – в транспортних пунктах на основі отриманої інформації, як це показано в п.3.3. Тому у вузлових пунктах здійснюється не тільки перетворення матеріальних потоків, а й приймаються попередні рішення щодо структури ТП, який буде виконуватись. У зв'язку з цим керівні рішення стосовно режимів руху АТЗ по магістралях і рішення, які виробляються у транспортних пунктах, повинні бути взаємно пов'язаними і не можуть прийматись ізольовано. Такі рішення стосуються першого класу задач. До цього класу відносяться такі задачі, як:

- побудова розкладів сукупності АТЗ;

- оптимізація циклічних планів перевезення;

- оптимізація планів перевезення унітарних вантажів із заданими часовими вікнами;

- оптимізація циклічних планів перевезення збірних вантажів.

Оскільки переважна більшість задач першого класу містить точки біфуркації, які пов'язані із якісними змінами МП, то для їх розв'язання потрібно застосовувати евристичні алгоритми, оскільки меоди точного гарантованого розв'язування нелінійних задач такого типу невідомі [158].

Транспортні пункти на МТМ можуть бути:

- вузловими, тоді у них виконується навантажувально-розвантажувальні операції і перенаправлення часткових вантажопотоків;

- навантажувально-розвантажувальними без перетинання вантажопотоків. Вузлові пункти мають більш гнучкі організаційні зв'язки з МТМ, оскільки вантажопотоки у цих пунктах зазнають розподілу, укрупнення, або подрібнення, а також ці пункти мають проміжні склади, які компенсують пульсацію вантажопотоків. Також характерно, що організація технологічних процесів у вузлових пунктах є обмежена допустимими обсягами складів, тривалістю відправки вантажних гуртів і кількістю АТЗ, які одночасно можуть обслуговуватись (фронтом). Навантажувально-розвантажувальні пункти, які не є вузловими мають жорсткіші організаційні зв'язки з ТП на МТМ, що пов'язано з відсутністю перенаправлення вантажопотоків. Тому затримки МП в цих пунктах залежить від параметрів маршрутів АТЗ, які сюди прибувають. Залежність організаційних параметрів ТП у навантажувально-розвантажувальних пунктах є лінійною. У зв'язку з цим усі задачі другого класу, незалежно від типу транспортного пункту, можна розв'язувати для вузлових пунктів методами математичного програмування.

Задачі третього класу стосуються диспетчерського керування парком АТЗ. Вони стосуються розподілу замовлень між вільними виконавцями, або ж розподілу АТЗ – для виконання наявних замовлень. У теорії транспортних процесів такі задачі є відомими під назвою транспортної задачі та її модифікації [124, 134]. Однак, відомі методи розв'язання таких розподільчих задач передбачали, що транспортні завдання є відомі на деякий період, а початкове розташування АТЗ на МТМ – фіксоване. В сучасних умовах така інформація є не завжди доступною, тому виникає необхідність розв'язувати розподільчі задачі в умовах невизначеності, або ж при динамічних початкових умовах. Зрозуміло, що методи лінійного програмування для цих задач є непридатними. Доцільно застосовувати методи динамічного програмування й теорії ігор.

Задачі четвертого класу відносяться до задач оптимального керування, однак поки що, враховуючи складність моделей транспортних засобів та різ-

номанітність дорожних і транспортних умов на МТМ, їх гарантовані точні розв'язки є невідомими. Тому застосовано методи варіаційного числення.

4.2 Побудова оптимального розкладу сукупності АТЗ

Пропонується методика побудови спільного циклічного унітарного розкладу з часовими вікнами, яка, на відміну від відомих методів дає наближений розв'язок з достатньою точністю оцінки відхилення за прийнятний час для малих і великих масивів даних, які оперативно поновлюються [192].

Формулювання задачі є таким. Впродовж деякого планового періоду T є відомою множина замовлень для АТП $P=\{1,2,\ldots,p\}$, які потрібно виконати з мінімальними затримками часу одним, або декількома транспортними засобами з множини M_k, $k=1\ldots m$, які спочатку періоду розташовані на МТМ 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, $i,j=1\ldots n$, $n<p$. Під унітарністю тут розуміється неподільність доставки вантажу за одну їздку. Прийнято, що між будь-якими двома пунктами на заданій МТМ 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 [181]. Кожен з пунктів мережі може бути водночас відправником, і/або споживачем вантажів. Оскільки задача стосується магістральних перевезень (міжміських, міжнародних), то головним критерієм для перевізника тут, переважно, є мінімум сумарного пробігу з вантажем впродовж заданого періоду при умові виконання заданого обсягу перевезень. Це досягається раціональною маршрутизацією і мінімальним незавантаженим пробігом. Звичайною умовою таких доставок є і те, що кожен готовий гурт вантажів не може бути перевезений частинами. Прийнято також, що $Q_{i.j}\leq q_k$, де q_k – номінальна вантажність k-го АТЗ для будь-якого $k=1,\ldots,m$. Це означає, що усі з наявних АТЗ можуть обслуговувати лише одне замовлення за одну поїздку водночас.

Тривалість виконання ТП є випадковою величиною з відомою оцінкою розподілу та, відповідно, математичним сподіванням часу $\bar{t}$, який складається з величин:

$$\bar{t} = t_{i.j} + t_u + t_{м.х.} + t_{org.}, \qquad (4.1)$$

де $t_{i.j}$ – час руху при доставці вантажу від пункту g_i до g_j при виконанні даного замовлення; t_u – час вантажних робіт в g_i пункті, $t_{м.\,х.}$ – час на марний пробіг до g_i пункту, необхідний для початку виконання замовлення; $t_{org.}$ – час організаційних простоїв.

У зв'язку з прийнятим припущенням про унітарність замовлень, складники t_u і $t_{org.}$ можна розглядати як постійну складову при виконанні усього обсягу перевезень, яка не залежить від їх розкладу, а тільки від технології вантажних перевезень. Через це ці елементи можна об'єднати з $t_{i.j}$ і розглядати $\bar{t} = t_{i.j}$. Отже, згідно з такими умовами, тривалість виконання кожного замовлення має дві складові: сталу, яка обумовлена прийнятими транспортними технологіями й змінну, яка залежить від того, якою є структура транспортного процесу, тобто яке замовлення виконував заданий транспортний засіб попередньо. Кожне i-те замовлення має такі характеристики: момент часу $t_{b.i}$, не раніше якого його потрібно розпочати виконувати у пункті його відвантаження; момент початку виконання i-го замовлення $t_{o.i}$; момент часу $t_{e.i}$, до якого його потрібно завершити, момент його фактичного завершення $t_{f.i}$ у кінцевому пункті його доставки. Оскільки тривалість $\bar{t}_i \le T$, то впродовж планового періоду кожен з автомобілів може виконати декілька замовлень. Щоб розпочати перше з них, АТЗ потрібно подати в той пункт, де замовлення є сформоване не пізніше директивного моменту часу $t_{e.i}$, до якого воно має бути виконане. Отже, потрібно врахувати тривалість нульових пробігів, а також час їздок $t_{i.j}$. Для виконання кожного наступного замовлення АТЗ потрібно подати для завантаження в найближчий 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 конеч-

на вимога виконання усіх замовлень множини P за період T. Отже тут відображаються ознаки задачі комівояжера (ЗК) з багатьма шляхами лише частково. Плануючи виконання перевезень, потрібно розробити, з одного боку, найкоротший за марним пробігом маршрут руху для кожного АТЗ, який буде задіяний в ТП, 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 ТП у середніх і великих транспортних системах, таку задачу потрібно віднести до оптимізаційних [151]. За складністю алгоритму пошуку оптимального розв'язку вона відноситься до *NP* складних задач, тобто для неї існує недетермінований алгоритм пошуку успішного точного, або наближеного розв'язку за поліноміальний час [182]. Для його розроблення використано метод впорядкування змішаних графів [170]. Згідно нього, усю множину P відомих замовлень відображає орієнтований змішаний граф $A(G,U,V)$, де G – множина вершин, $\{g_1, g_2, \ldots, g_{p-1}, g_p\}$, в якій $g_2 \ldots g_{p-1}$ 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. 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:

$$-a_{j.i} \le t_{o.j} - t_{o.i} \le a_{i.j}, \qquad (4.2)$$

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 АТЗ до початку завантаження перебував у i-му пункті уже, і на марний, чи нульовий пробіги не витрачено часу. Очевидно, що:

$$a_{i.P} \le a_{i.j}. \qquad (4.3)$$

Умова (4.3) 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* АТЗ. Вони повинні працювати синхронно, 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 *y*, а далі нема жодного шляху у графі *A* з невід'ємною, або ненульовою вагою, то ланцюг при цьому прямує до вершини g_p. Транспортний цикл для цього автомобіля вважатимемо завершеним, незважаючи на те, що резерв часу на виконання інших, ще не виконаних замовлень є. Задача в такому формулюванні є схожа на типову задачу декількох комівояжерів з декількома відмінностями:

1) період *T* не є наперед заданою величиною й не шукається найкоротше його числове значення;

2) допускається багаторазове, циклічне проходження автомобілем будь-якого транспортного пункту;

3) довжина будь-якої ланки будь-якого ланцюга є величиною змінною. Вона залежить від послідовності виконання замовлень. Адже замовлення

можуть виконуватись в обмежений період, отже одне і теж замовлення, яке не розпочато вчасно, може бути виконано із затримкою;

4) кількість заданих АТЗ може не дорівнювати кількості реально задіяних до перевезення; крім того, щоб формалізувати дефіцит перевізних спроможностей парку АТЗ при заданій інтенсивності потоку замовлень, задаються фіктивні АТЗ, таким чином, з усіх знайдених формальних шляхів у графі *A* вибираються найкращі; інші, менш вдалі приписують фіктивним транспортним засобам.

Алгоритм розв'язування задачі є таким. Множину $M=\{1,2,\ldots,M\}$ транспортних засобів розбиваємо на *m* непорожніх підмножин M_k, які попарно не перетинаються. Кожна підмножина M_k, $k=1,2,\ldots,m$ характеризується тим, що саме вона має такі автомобілі, кожен з яких найбільш ефективно може виконати замовлення з перевезення вантажів обсягом q_k. Множину замовлень *G* також розбито на *k* непорожніх підмножин G_k, $k=1,2,\ldots,n$, кожна з яких характеризується тим, що для її виконання найкраще підходить автопоїзд вантажністю q_k. В загальному випадку $m \neq n$. В задачі потрібно побудувати розклад виконання заданих замовлень на перевезення, тобто для кожної поїздки з вантажем $i \in G$ вказати момент її початку $t_{o.i}$, і момент закінчення $t_{f.i}$, а також номер автопоїзда M_k, на якому вона повинна виконуватись. Оптимальним вважається розклад для якого виконується умова:

$$F\left(t_{o.1},t_{o.2},\ldots,t_{o.p}\right)\rightarrow \min, \qquad (4.4)$$

де *F* – функція мети, що є неспадною за кожним своїм аргументом.

Запропонований алгоритм базується на методі «гілок і меж» [170]. Для цього відомий алгоритм побудови оптимального розкладу адаптовано до умов поставленої нами задачі. Означимо деякі використані терміни. Шляхом в графі $A(G,U,V)$ називається послідовність дуг $U_k=\left\{(g_1,g_i),(g_i,g_j),\ldots(g_x,g_p)\right\}$, де всі вершини *q* різні, а початкова і кінцева – можуть збігатись. Контур – це замкнутий шлях в графі *A*. Вагою шляху назвемо суму ваг дуг, що входять до нього. Вага шляху виражається чисельно в межах інтервалу (-∞,+∞), тобто є

дійсним числом. В зв'язку з цим використовується термін *контур*, або шлях додатної (або від'ємної) ваги. Шлях найбільшої додатної ваги в графі *A*, що з'єднує *i, j* вершини, позначимо ϑ_{ij}. Якщо в графі $A(G,U,V)$ не існує шляху з вершини *i* у вершину *j* через ліквідацію деяких ребер, то $\vartheta_{ij}= -\infty$.

Для того, щоб шуканий розклад $\{t_{o.1},t_{o.2},\dots t_{o.p}\}$ був однозначним (не було часового неузгодження), потрібно дотримуватися умови (4.3). Момент початку виконання будь-якого *i*-го замовлення шукається із співвідношення:

$$t_{o.i} = \max_j \{0, \vartheta_{i.j}\}, \quad 1 < j < p\,. \tag{4.5}$$

Момент завершення будь-якого *i*-го замовлення знаходимо з виразу:

$$t_{f.i} = t_{o.i} + a_{i.p} < t_{e.i}\,. \tag{4.6}$$

Розклад, для якого для всіх замовлень й усіх автомобілів виконується умова (4.5) називається активним, а величина $t_{f.i}$, що розрахована за (4.6), буде найбільш раннім завершенням *i*-го замовлення. Існує взаємно однозначна відповідність між множиною всіх активних розкладів, що побудовані з графа A і множиною $\hat{P}(A)$ всіх графів, які не містять контурів додатної ваги [170]. Отже, однозначним вважаємо розклад, що породжений графом $A(G,U,V)$і не містить контурів додатної ваги, а значить і ребер *V*. Застосовано послідовний аналіз варіантів з перебором усіх графів з множини $\hat{P}(A)$, і пошуком серед них оптимального за критерієм (4.4). Для організації такого пошуку, з метою уникнути непродуктивного перебору неоптимальних варіантів, використано процедуру послідовного розбивання $\hat{P}(A)$ на підмножини. Множина $\hat{P}(A)$ розбивається спочатку на підмножини $\hat{P}(A_1)$, $\hat{P}(A_2)$, .., $\hat{P}(A_h)$, де A_k, $k=1\dots h$, – графи, що отримані з A в результаті заміни, чи ліквідації одного чи декількох ребер. Ребра заміняються на дуги у двох варіантах. Так ребро $[a,b]$ можна замінити дугою (a,b), або (b,a). Далі підмножини $\hat{P}(A)$ ще розбиваємо на підмножини. В результаті скінченного числа таких дій отримуємо всі можливі варіанти перебору-розбивання. Цю процедуру можна показати у вигляді де-

рева (Z_m, W_m), де Z_m – множина вершин, що означають початкові графи $A(G, U_k, V_k)$, $U_k \subset U$, $V_k \subset V$, а W_m – множина дуг – шляхів перебору. Коренем цього дерева є граф $A(G, U, V)$. На кожному кроці обчислюється нижня оцінка оптимальності:

$$f^{\circ} = \inf\left(\min\left\{F\left(t_{o.1}, t_{o.2}(G, U'), \ldots, t_{o.p}(G, U')\right)\right\} \middle| (G, U') \in \hat{P}(A_1)\right), \qquad (4.7)$$

яка описана у співвідношенні (4.4). Вершину Z_i назвемо завершальною, якщо виконується нерівність:

$$f^{\circ}(A_1) \le r_m, \qquad (4.8)$$

де r_m – поточний рекорд нижньої оцінки:

$$r_m = \min\left\{f^{\circ}(A_1) \middle| A_1 \in Z_m\right\}. \qquad (4.9)$$

Якщо нерівність (4.8) виконується, то вершину Z_i надалі не розглядаємо, а шлях, в який входить вершина Z_i в графі (Z_m, W_m), вважаємо хибним. Процедура завершується, коли всі вершини, крім шуканої, відкинуті.

Зміст операцій з графом $A(G, U, V)$ полягає в наступному. Якщо два замовлення *i, j* належать одній підмножині G_k і призначені для одночасного виконання одним автомобілем, то ніякий часовий зв'язок між ними не повинен бути, а ребро невпорядкованої моделі $[i, j] \in V$ усувається. Якщо ж ці замовлення i, j виконуватимуться послідовно, незалежно від їх обсягу, то ребро $[i, j] \in V$ замінюється дугою (i, j) ваги $a_{i.j}$, або дугою (j, i) ваги $a_{j.i}$.

Крім оперування з основним графом $A(G, U, V)$, створюємо і оперуємо із допоміжним неорієнтованим графом $H_k(G_k, V_k)$, вершинами якого є члени підмножини G_k. Отже, число таких графів буде $k = m$. Граф будується так. Якщо операція α_1 з основним графом є знищення ребра $[i, j]$, то граф $H_k(\alpha_1)$ отримуємо з графа $H_k(\alpha_0) = (G_k, \varnothing)$ в результаті додавання ребра $[i, j]$. Якщо операція α_1 – заміна ребра $[i, j]$ однією з дуг (i, j), або (j, i) в графі $A(G, U, V)$, то граф $H_k(\alpha_1)$ отримуємо з графа $H_k(\alpha_0)$, ототожнивши вершини i, j з однією

вершиною. Якщо α_1 – перетворення ребра $[i, j]$, $i \in G_{k1}$, $j \in G_{k2}$, $k_1 \neq k_2$, то $H_k(\alpha_1) = H_k(\alpha_0)$. Очевидно, що кількість вершин в графі H_k не більша, ніж M_k. Обчисливши хроматичне число $\chi(H_k(\alpha_n))$, можемо визначити обмеження, яке накладає на остаточний оптимальний варіант розкладу різноманітність рухомого складу і обсяги вантажів у замовленнях:

$$\chi(H_k(\alpha_n)) \leq M_k, k = 1,2,\ldots,m. \quad (4.10)$$

Ця умова означає обмежені можливості (виконувати декілька замовлень одночасно) через відсутність необхідної кількості рухомого складу, організаційно встановлену послідовність виконання тощо. Для того, щоб вести цілеспрямований пошук в графі, використано розуміння конфліктного ребра, тобто такого, для якого не виконується умова нерівностей (4.2). Серед конфліктних ребер графа $A(G,U,V)$ можна знайти найконфліктніші, тобто такі, перетворення яких приводить до більшого пошукового ефекту. Для цього для кожного конфліктного ребра потрібно знайти величину:

$$h_{ij} = t_{e.j}(G,U) + \vartheta_j(G,U) + a_{i.j} - \vartheta(G,U), \quad (4.11)$$

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.

Алгоритм складається з одинадцяти кроків.

1. Перевірити, чи граф $A(\alpha_1) = A(G,H)$ містить контур додатної ваги, де α_1 – l-й цикл алгоритму. Якщо такий контур є, то перейти до кроку 10.

2. Знайти ранній початок виконання кожного замовлення за формулою (4.5). Знайти найбільш пізнє закінчення виконання замовлень за формулою (4.6). Якщо знайдені величини не відповідають директивам, то перейти до кроку 10.

3. Знайти множину конфліктних ребер графа $A\left(\alpha_1^0\right)$ і найконфліктніше серед них. Якщо множина порожня, то перейти до кроку 11.

4. Замінити конфліктне ребро $[i, j]$ в графі $A\left(\alpha_1^0\right)$ дугою (i, j), в графі $A\left(\alpha_2^0\right)$ – дугою (j,i); в графі $A\left(\alpha_3^0\right)$ – знищити ребро [i, j].

5. Створити відповідні допоміжні графи $H_k\left(\alpha_1^0\right)$, $H_k\left(\alpha_2^0\right)$, $H_k\left(\alpha_3^0\right)$, $z = 1,2,\ldots$ $k = 1,2,\ldots,m$. Обчислити хроматичне число кожного з допоміжних графів $\chi\left(H_k\left(\alpha_{1+z}\right)\right)$.

6. Якщо для графа H_k виконується нерівність (4.10), то перейти до 10.

7. Якщо в графі $H_k\left(\alpha_{1+z}\right)$ є петлі, тобто $H_k(i,i) = 1$, то перейти до кроку 10.

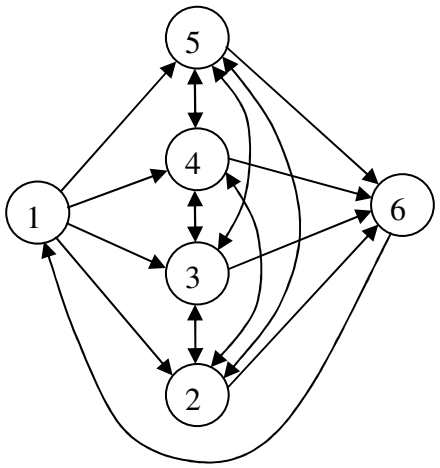
8. Для графів $A\left(\alpha_{1+z}^1\right)$, $A\left(\alpha_{1+z}^2\right)$, $A\left(\alpha_{1+z}^3\right)$ здійснити почергово кроки 2, 3, 9.

9. Обчислити поточний рекорд r_m серед введених графів за формулою (7). Якщо $r_m\left(A\left(\alpha_{1+z}\right)\right) \le r_m\left(A\left(\alpha_{1+z-1}\right)\right)$, то перейти до кроку 11, якщо ні – до кроку 4.

10. Граф вважається виродженим (в його побудові є недопустима помилка) і побудувати за ним розклад неможливо.

11. Шуканий розклад – $\left\{t_{o.1}, t_{o.2}, \ldots t_{o.p}\right\}$. Функцію мети за виразом (4.4).

Приклад початкової невпорядкованої моделі замовлень подано на рис.4.3. Окремі результати оптимізації за розробленим алгоритмом подано на рис.4.4. Потовщені дуги входять до критичного шляху, тобто такі, за якими обчислюються моменти ранніх закінчень виконання замовлень $t_{o.i}$.



$a_{1.2}$=1 $a_{3.5}$=8 $a_{6.2}$=−13
$a_{1.3}$=2 $a_{3.6}$=4 $a_{6.3}$=−12
$a_{1.4}$=3 $a_{4.2}$=6 $a_{6.4}$=−7
$a_{1.5}$=12 $a_{4.3}$=5 $a_{6.5}$=−24
$a_{2.3}$=4 $a_{4.5}$=12 $a_{6.1}$=−26
$a_{2.4}$=6 $a_{4.6}$=4
$a_{2.5}$=5 $a_{5.2}$=5
$a_{2.6}$=3 $a_{5.3}$=8
$a_{3.2}$=5 $a_{5.4}$=10
$a_{3.4}$=5 $a_{5.6}$=4

Рисунок 4.3 – Тестова модель складання розкладу виконання замовлень на перевезення вантажів: $a_{i\,i}$ – ваги дуг

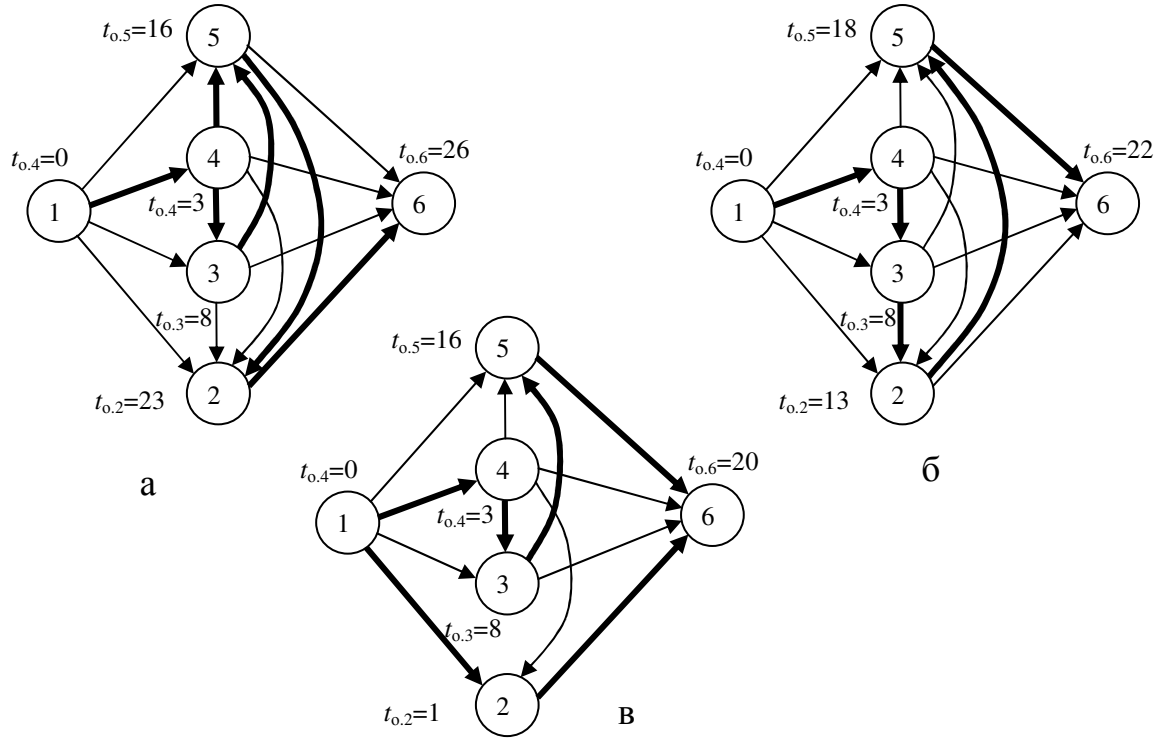


Рисунок 4.4 – Результати впорядкування змішаного початкового графа: а)при відсутності обмежень на директивні терміни завершення виконання замовлень, кількість автомобілів m=1; б) при наявності обмежень на директивні терміни завершення виконання замовлень, кількість автомобілів m=1; в) при наявності обмежень на директивні терміни завершення виконання замовлень, кількість автомобілів m=2

Як видно з результатів, усі директивні терміни тестової моделі дотримано. Це стосується і загальної тривалості циклу – 26 год., і часу завершення

окремих замовлень. Якщо величину $-a_{6.1}$ послідовно зменшувати, то це приведе до зміни структури початкового графа й інших результатів. Так триватиме доти, поки впорядкування графа взагалі буде можливим, про що алгоритм видає повідомлення на 10-му кроці. Отже такий спосіб можна використовувати для покрокової оптимізації за тривалістю сукупного проекту. Застосування додаткових АТЗ не суттєво покращує тривалість виконання замовлень. Так, введення двох (рис. 4.4, в) автомобілів, порівняно з одним (рис. 4.4, б) скорочує тривалість циклу лише на 2 години. Натомість другий автомобіль використовується у побудованому проекті ТП досить неефективно: за 20 год. циклу його зайнятість становить лише 3 год. Крім того, ще 1 год. – на нульовий пробіг. Тому запропоновану методику потрібно використовувати, моделюючи різні початкові умови.

Поданий алгоритм запрограмовано на комп'ютерну мову *Delphi 7* зі зручним інтерфейсом, яку можна використовувати в практиці оперативного керування транспортним процесом (додаток В).

4.3 Оптимізація циклічних планів перевезення збірних вантажів

При дослідженні синергетичного ефекту, пов'язаного з інтеграцією елементів ТП по-новому розглянуто задачу формування інтегрованої системи доставки для множини невзаємозамінних збірних вантажів [168, 194]. Кожен вантажопотік приймався таким, що заданий і таким, що складається з допустимих l гуртів відправки. Кожному гурту $q_{i.j.l}$ поставлено у відповідність набори індексів i, j, l – пункт відправлення, пункт призначення і номер гурту з пункту відправлення. Математична модель формування інтегрованої схеми доставки для даної постановки дала змогу, з одного боку, однозначно проектувати маршрут доставки для кожного вантажного гурту, з іншого боку – врахувати можливість сумісного проходження вантажних гуртів по шляхах сполучення з метою зниження загальносистемних витрат. Така модель об'єднує обмеження, які стосуються оптимізації потоків окремих гуртів ван-

тажів, що розв'язувались методом пошуку найкоротших ланцюгів між двома заданими вершинами графа заданої мережі, що розглянуто у попередньому пункті. Такий підхід не має цілковитої адекватності розв'язків, тому що наявність декількох гуртів відправки в одному транспортному пункті передбачає, формально, декілька транспортних циклів. Однак відомо, що у графах, що містять петлі, або інші замкнені контури, неможливо наявними математичними засобами побудувати однозначний найкоротший шлях між будь-якими двома вершинами [170]. Тому в згаданій роботі [168] цю складність обминули, застосовуючи, знову ж таки, декомпозицію та агрегатування загальної задачі. Відомо, що при такій декомпозиції гарантований оптимум не забезпечується, натомість його замінюють нижньою оцінкою [195, 196].

У кожній з дотепер відомих задач оптимізації потоків на мережах об'єктами впорядкування є одиничні (нециклічні) потоки, які потрібно опрацювати впродовж обмеженого і, як правило, відомого фіксованого періоду. Відомі лише деякі роботи, в яких були спроби розглянути задачу про потоки на мережах в динаміці, тобто при зміні тривалості періоду, коли є інформація про них [171, 197-200]. Проте, ці роботи стосуються перспективного планування розвитку транспортних мереж і для оперативного планування не можуть бути застосовані. Тому ставилась задача розробити таку методику і відповідний алгоритм пошуку гарантованого оптимального розв'язання задачі, яка стосується оптимального розподілу фіксованих вантажопотоків між обмеженою кількістю транспортних засобів при наявності циклів.

Типова виробнича задача, яка виникає у середніх за розміром вантажних автомобільних перевізників є такою. На деякий період τ для парку автомобілів, кількістю R кожен з яких має вантажність q_n, є відомі замовлення, які можна подати як потенційні вантажопотоки $Q_{i.j}$, де i, j – номери пунктів, відповідно, відправлення і споживання вантажів. Кожен вантажопотік може бути реалізованим по частинах (гуртах) $q_{i.j.z}$, де z – номер гурту. Гурти вантажів можна відправляти в довільному порядку впродовж періоду τ. Розмір

гурту не перевищує вантажності будь-якого із заданих автомобілів, тобто $0 < q_{i.j.z} < q_n$. В зв'язку з цим є можливість суміщення перевезень шляхом об'єднання гуртів від різних відправників в одному транспортному засобі (збірні вантажі):

$$Q_{\xi.j} = q_{i.\xi} + q_{\xi.j} + q_{i.j}, \tag{4.12}$$

де i, ξ, j – номери транспортних пунктів, між якими є виконується пробіг з вантажем $l_{i.\xi} \neq 0$, $l_{\xi.j} \neq 0$.

Виконавши перевезення гурту $q_{i.j.z}$, деякий автомобіль з наявного парку може відправитись в наступний пункт x для завантаження чергового гурту вантажів і доставки його в пункт *y*. При цьому він має зробити марний пробіг тривалістю $t_{j.x}$. Якщо завантаження автомобіля може відбутися в пункті *j*, то, відповідно, марного пробігу не буде. Якщо ж не увесь вантаж вивезено з пункту *i*, то автомобіль може повернутись туди, зробивши повторний транспортний цикл. Таким чином, усі автомобілі з парку *R* виконують комбіновані маршрути, які складаються з пробігів з вантажем, марних пробігів, маятникових та кільцевих маршрутів. Усі автомобілі повинні виконати спільне завдання за директивний період τ, за мінімальну загальну тривалість *T*. Через різноманітність маршрутів буде спостерігатись нерівність:

$$\tau > \frac{T}{R}. \tag{4.13}$$

Параметр τ набуває значення *такту виконання сукупного обсягу відомих замовлень*. Очевидно, що чим більше його числове значення, тим більший обсяг перевезень є заданий (при стаціонарності джерел вантажопотоків). З іншого боку, великі обсяги перевезень вимагають значних перевізних спроможностей парку, тобто зростання *R*. Оптимальним планом перевезення вважатимемо такий, за якого досягається мінімальна тривалість *T* усіх поїздок транспортних засобів, а нерівність (4.13) прямує до рівності, що, фактично, означає рівномірне завантаження парку автомобілів. Задачу з таким фізичним змістом подано у вигляді графа, а розв'язання – як операції над ним. Розгля-

дається граф транспортної мережі $A(G,U,V)$, де G_i – множина вершин – транспортних вузлів, $i=\overline{0\ldots n}$, U,V – множина дуг і ребер – шляхів сполучення. Дуги графа *A* – зважені. Кожній дузі надано вагу $t_{i.j}$ – тривалість виконання пробігу вздовж заданого шляху сполучення. Якщо між будь-якими двома вершинами i,j не існує безпосереднього зв'язку, то $t_{i.j}=+\infty$.

Дугам, також, поставлена у відповідність матриця потенційних вантажопотоків $\left(Q_{i.j}\right)$. Якщо, при $Q_{i.j}>0$ і $t_{i.j}=+\infty$, але $t_{i.\xi}\ll+\infty$ і $t_{\xi.j}\ll+\infty$, то потік $Q_{i.j}$ розкладається на два елементарні: $Q_{i.j}=Q_{i.\xi}=Q_{\xi.j}$. Отже, фактично кожен ненульовий елемент матриці $\left(Q_{i.j}\right)$ – пара суміжних вершин графа *A*.

Кожен вантажопотік $Q_{i.j}$ – сумарна величина, яка складається з елементарних кореспонденцій:

$$Q_{i.j}=\sum_{m=1}^{Z}q_{i.j.m}, \tag{4.14}$$

де $q_{i.j.m}$ – складова ваги дуги *V* графа *A*, $Z=\left[\frac{Q_{i.j}}{q_n}\right]$, q_n – величина, яка обмежує елементарний вантажопотік, квадратні дужки означають ділення із заокругленням до більшого цілого.

Серед вершин графа A є множина G_φ таких, з яких виходять вантажопотоки, тобто джерела: $Q_{i.j}\neq 0,\quad g_i\in G_\varphi$, а також множина G_ψ – вершин поглинання, для яких $Q_{i.j}\neq 0,\quad g_j\in G_\psi$. Приклад такого графа – на рис. 4.5. Однією з особливостей даної моделі, на відміну від відомих моделей транспортних потоків, є те, що вершини-джерела можуть бути, одночасно, вершинами-поглиначами: $G_\varphi\cap G_\psi\neq\{\varnothing\}$. На рис. 4.5 такими вершинами є 1, 2, 4. Однак, граф *A*, при цьому, не має петель, тобто ваги $t_{i.i}=0$ і $q_{i.i}=0$.

Граф *A* має таку вершину g_o, яку назвемо початковою, яка з'єднана дугами з вершинами множини G_φ, тобто, для неї виконуються умови: $q_{0.i}\neq 0$, для будь-якої $g_i\in G_\varphi$ і $g_{j.0}=0$ для будь-якого *j*. Кінцева вершина графа – g_n,

для якої $q_{j.n} \neq 0$, для будь-якої $g_j \in G_\psi$. Між початковою g_o і кінцевою g_n вершинами графа A існує злічена кількість μ ланцюгів. Кожен з $\upsilon_1 \ldots \upsilon_\mu$ ланцюгів складається, щонайменше, з однієї дуги $(0,i)$, однієї дуги (j,n), та однієї дуги (k,p), $i, j, k, p = \overline{1, n-1}$.

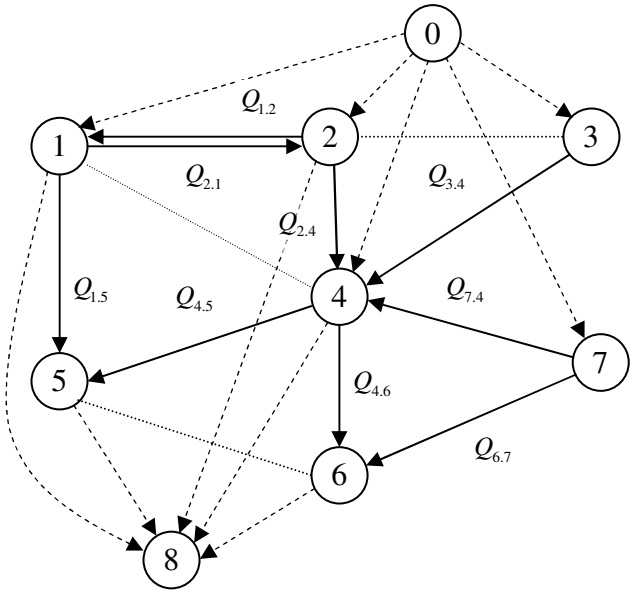


Рисунок 4.5 – Початковий граф МТМ з потенційними вантажопотоками

→ – потенційний вантажопотік;
····· – шлях сполучення без вантажопотоку;
----→ – зв'язки з вершинами-джерелами і поглиначами

Задано деяке ціле, невід'ємне число $R > 0$. Потрібно знайти R ланцюгів, які пролягають від g_o до g_n таких, що:

сума ваг усіх дуг, які входять в усі ці ланцюги: $\sum_{r=1}^{R} q_{i.j.r} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} Q_{i.j}$;

будь-яка дуга, що входить в r-й ланцюг, має вагу $q_{i.j.r} \leq q_n$.

Кожен r-й ланцюг, $r = 1, 2, \ldots \mu$ характеризується тактом:

$$\tau_r = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} t_{i.j}, \qquad (4.15)$$

де j, i – такі, що $g_j, g_i \in \nu_r$.

Ланцюг, для $\tau = \max_R \{\tau_r\}$ становить критичний шлях у графі A.

Розподіл парку АТЗ по завданнях, які ще не сформульовані, але є задані їх складники, на транспортній мережі, має зміст такої задачі впорядкування. Використано змінні $x_{i.j}$ – кількість поїздок, які автомобіль з вантажністю q_n повинен зробити від i-го до j-го пункту, $x_{i.j} = \{0,1,2,\ldots\}$, виконуючи перевезення $q_{i.j}$. При цьому обидва пункти можуть бути транзитними, якщо брати до уваги задані вантажопотоки. Формується лінійна модель. Критерій – мінімальна загальна тривалість пробігів:

$$\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=1}^{n-1} t_{i.j} \cdot x_{i.j} \to \min . \tag{4.16}$$

Обмеження на змінні:

$$\sum_{j=1}^{n-1} x_{i.j} - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i.j} = 0, \tag{4.17}$$

яке означає, що кількість потоків, які входять у будь-яку вершину, крім кінцевої, дорівнює кількості потоків, які виходять з цієї вершини;

$$\sum_{j=1}^{n} x_{0.j} = R, \tag{4.18}$$

означає, що кількість потоків, які виходять з нульової вершини, дорівнює кількості транспортних засобів, які задані цілим числом R;

$$\sum_{i=0}^{n-1} x_{i.n-1} = -R, \tag{4.19}$$

означає кількість потоків, які входять в кінцеву вершину, дорівнює $-R$

$$x_{i.j} \geq \frac{Q_{i.j}}{q_n}, \tag{4.20}$$

обмеження на мінімальну кількість поїздок від i-го до j-го споживача, яка забезпечить виконання відомого транспортного завдання (обсягу перевезень).

Це – перший етап задачі, оскільки визначення кількості їздок $x_{i.j}$ ще не означає їх часову впорядкованість. Розв'язання цього етапу не становить складностей, оскільки за загальними ознаками вона підходить під формулювання задач лінійного програмування. Приклад впорядкування графа A, що

на рис. 4.5, при *R*=2 подано на рис. 4.6. Граф оптимальних пробігів, що отримано в результаті розв'язання задачі лінійного програмування (ЛП), містить цикли. Від 0-вершини до кінцевої 8-ї у цього графа є два ланцюги. Проте записати їх однозначно неможливо через наявність циклів. Цикли відображаються ребрами (обопільні стрілки на рис. 4.6) – маятниковими маршрутами, або ж складаються із замкнених контурів. Для впорядкування графа і пошуку критичного шляху у ньому в теорії використовують перетворення, що приводять до ліквідації циклів [183].

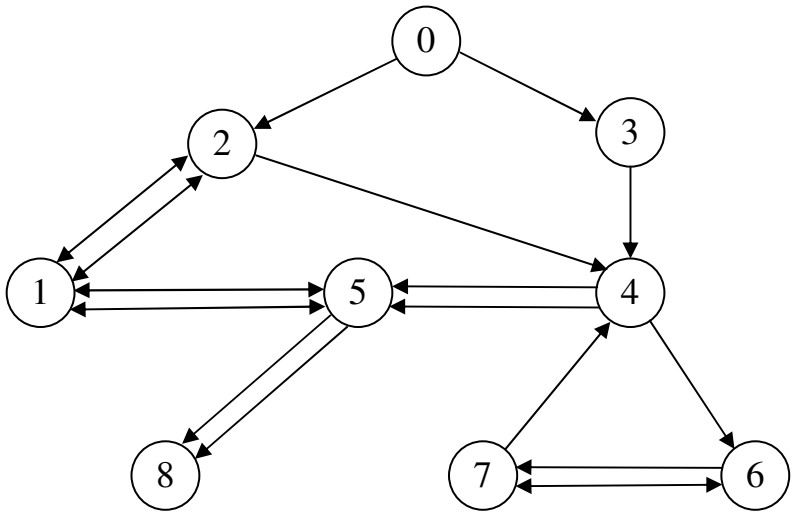


Рисунок 4.6 – Граф оптимальних за тривалістю пробігів двох автомобілів

Для цього ребра замінюють дугами, або видаляють їх. В даному випадку цього робити з графом не можна, тому що кожне ребро і дуга має зміст фактично запланованих пробігів з вантажем, чи без вантажу. Тому запропоновано методику, яке передбачає два додаткові перетворення: 1) перехід від кратних дуг (ребер) до кратних вершин похідного графа; 2) синтез графа подій з графа станів. Граф, що містить цикли, можна виявити за матрицею змінних $M = \left(x_{ij}\right)$. Так, якщо для будь-якої i-ї вершини визначити число ρ, і воно є $\rho = \sum_{j=1}^{n} x_{i.j} > 1$, то це є ознакою, що в графі є ρ циклів, пов'язаних з вершиною *i*. Такий граф можна перетворити в граф $в$, який не міститиме циклів, якщо ввести ρ–1 додаткових вершин, а ребра замінити на відповідну кількість дуг

так, що між будь-якими двома вершинами графа не було кратних дуг. При цьому залишається невизначеність стосовно зв'язків нових вершин. Так, якщо в графі *A* була вершина g_i, замість якої в граф *B* було введено вершини $g_{i.1}, g_{i.2}, \dots g_{i.\rho}$, то зміст невизначеності полягає в тому, що невідомо, як перетворити ребра графа *A* на дуги графа *B*. Найкраще щоб різниця в довжині ланцюгів, які утворюються в графі від початкової вершини до кінцевої була мінімальною, тобто:

$$\tau_{\max} - \tau_{\min} \to \min . \tag{4.21}$$

Для того, щоб такий перерозподіл виконати, замінимо граф *A* на граф подій *C*. Вершинами графа *C* є відображення:

$$s_i = F\left(u_{i.j}\right), \tag{4.22}$$

де $u_{i.j}$ – дуга графа *A*. При цьому початкова і кінцева вершини графа *A* замкнені дугою $g_{n.1}$. Перелік усіх можливих дуг взято з матриці *M*. Для них, а отже і для вершин графа *C* можна знайти часткові відношення впорядкування. Так, якщо $s_i = F\left(u_{i.j}\right)$, а $s_j = F\left(u_{j.\xi}\right)$, то очевидно, що в графі *C* будуть відношення порядку $s_i \to s_j$. Для остаточного впорядкування було сформульовано таку задачу. Використаємо змінні $y_i \in \{1, 2, \dots Z\}$ – цілі додатні числа, *Z* – кількість дуг графа *B*. Потрібно знайти такі їх значення, які б задовольняли:

$$\max_R \left(\sum_{i=0}^{Z} t_i \cdot y_i \right) \to \min , \tag{4.23}$$

де *R* – кількість контурів (ланцюгів від S_o до S_n), які можуть бути в графі *C*; $t_i = t_{i.j}$ з матриці *A*, при обмеженні: для будь-яких $i \neq j$, $y_i \neq y_j$; $y_j - 1 = y_i$, якщо існує відношення порядку між операціями $s_i \to s_j$.

Розв'язавши поставлену задачу, впорядковуємо граф *C*, а від нього – граф *B*, отримавши граф оптимальних циклів для *R* АТЗ (рис. 4.7). Такий граф гарантовано відображає *оптимальний розклад* їздок автомобілів при умові виконання усього запланованого обсягу вантажопотоків зі збірними вантажами. Функціями його є сумарна тривалість усіх пробігів (з вантажем і без) АТЗ, що задіяні до процесу, а також *такт*, як критичний шлях даного

графа. Для прикладу, показаного на рис. 4.7 легко знаходяться два ланцюги від початкової до кінцевої вершини. Тривалість цих ланцюгів, становить, відповідно 41 та 47 год. Сумарна тривалість усіх їздок – 88 год. Очевидно, що розв'язана таким чином задача не дає рівності тривалості роботи усіх АТЗ. Але її наближення за виразом (4.23) є досягнуто.

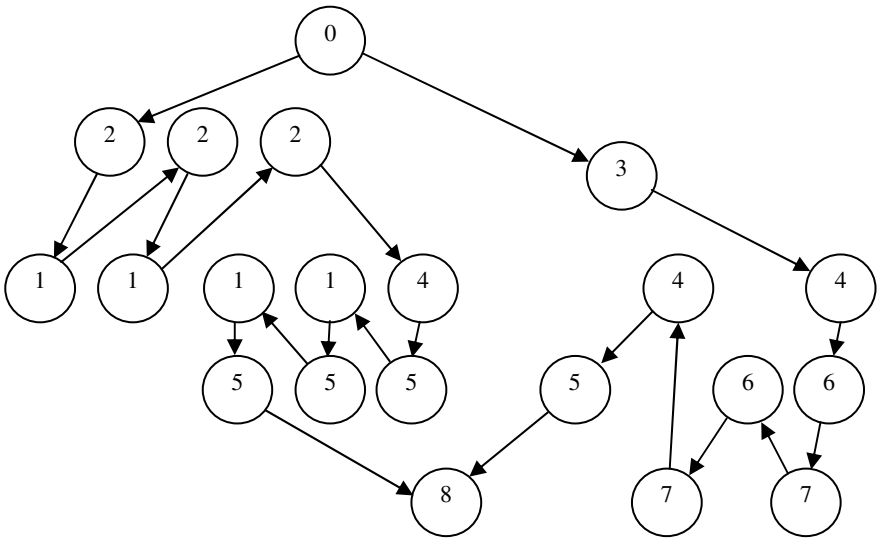


Рисунок 4.7 – Граф оптимальних за тривалістю маршрутів двох автомобілів

Залежність цих тривалостей від кількості задіяних транспортних засобів показано на рис. 4.8, з якого видно, що найменш ефективно за часом використовується ТП, при якому усі вантажопотоки обслуговуються одним АТЗ.

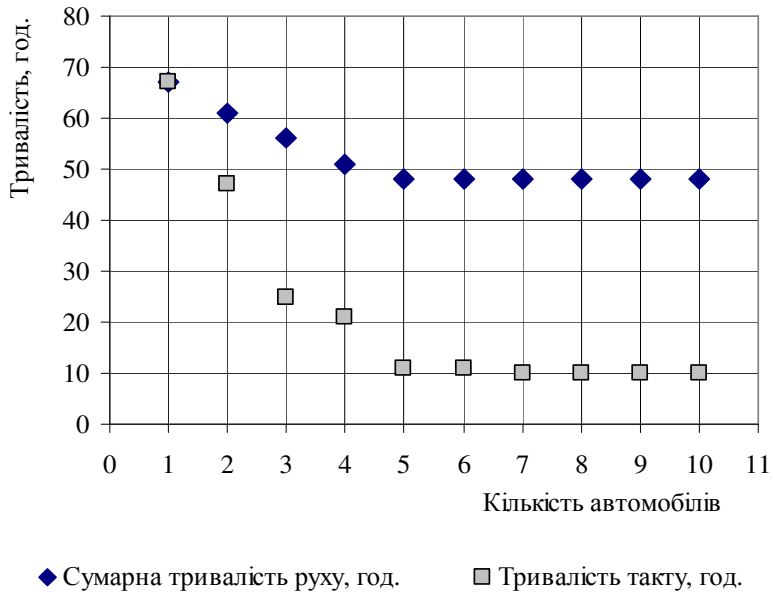


Рисунок 4.8 – Залежність тривалості їздок та такту від кількості АТЗ

При залученні додаткових АТЗ сумарна тривалість їх руху скорочується до певної межі (на рис. 4.8 – до п'яти АТЗ). Залучення додаткових автомобілів понад цю межу, очевидно, не дає сподіваного результату. Ефективність використання автомобілів можна порівняти за коефіцієнтом використання фонду відведеного для них часу:

$$\eta_t = \frac{T}{R \cdot \tau_{\max}}, \tag{4.24}$$

де T – сумарна тривалість поїздок, год.; $\tau_{\max}$ – максимальний такт роботи транспортної схеми. Залежність η_t від кількості АТЗ, R подана на рис. 4.9.

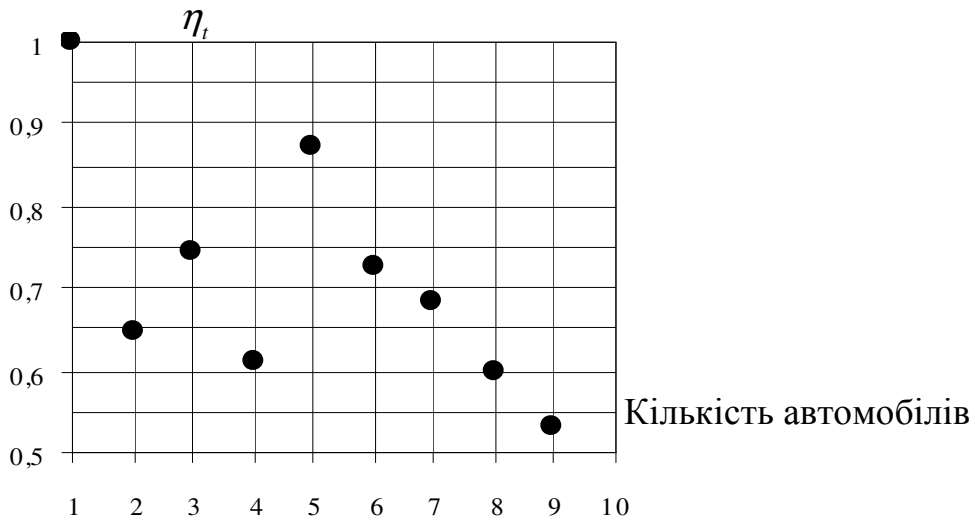


Рисунок 4.9 – Залежність коефіцієнта використання часу від кількості АТЗ

Отримана залежність показує, що найбільш ефективною ТТС за використанням часу є схема з одним автомобілем. За нею слідує схеми при $R = 5$, яка є компромісною за обома критеріями і може бути рекомендована при наявності інформації про вантажопотоки, щонайменше, на 10 год. на майбутнє. Залучення більшої кількості автомобілів призводить до їхнього простоювання в очікуванні черги, або ж в дублюванні маршрутів. При цьому період прогнозування вантажопотоків суттєво не зміниться. Меншою кількістю автомобілів не можна швидко виконати завдання, або ж його неможливо рівномірно розподілити між автомобілями, внаслідок чого деякі з них будуть надмірно довго простоювати. Запропонована методика дає змогу розв'язувати транс-

портні задачі з циклами, отримуючи при цьому гарантований оптимум методами ЛП [196]. Такі задачі є ближчі за змістом до виробничих, оскільки на даний час більшість вантажопотоків є наперед задані, фіксовані.

4.4 Оптимізація циклічних планів перевезення унітарних вантажів із заданими часовими вікнами

Формулювання задачі планування системи доставки унітарних вантажів має деякі особливості, які полягають у тому, що транспортні цикли кожного АТЗ, який використовується заданій МТМ, включає лише два пункти. Впродовж деякого періоду T є відомою множина замовлень $P=\{1,2,\ldots,p\}$, які мають бути виконані без перерв одним, або декількома транспортними засобами M_k, $k=1,\ldots,m$. Зміст кожного замовлення полягає в тому, щоб доставити унітарний гурт вантажів $Q_{i.j}$ від деякого пункту g_i до іншого пункту g_j, $i,j=1,\ldots,n$. Час обслуговування p-го замовлення є випадковою величиною з відомою оцінкою розподілу і, відповідно, математичним сподіванням:

$$\bar{t}_p = t_{ij} + t_u + t_{org.}, \tag{4.25}$$

де t_{ij} – час руху між i-м та j-м транспортними пунктами; t_l – час вантажних робіт, $t_{org.}$ – час організаційних простоїв.

У зв'язку з прийнятим припущенням про унітарність замовлень, складники t_u і $t_{org.}$ можна розглядати як постійну складову при виконанні усього обсягу перевезень, яка не залежить від їх розкладу, а залежить тільки від технології вантажних перевезень. Через це дані елементи можна об'єднати з $t_{i.j}$ і розглядати $\bar{t}_p = t_{i.j}$. Кожне замовлення має такі характеристики: момент часу eb_i, не раніше якого воно має бути розпочинатись виконуватись у пункті i, дозволений інтервал $eb_i + \Delta_i$, впродовж якого виконання має бути розпочато. Після цього наступає момент ef_i, після якого замовлення вже не можна виконати через неготовність i-го пункту відправлення. Такі ж характеристики мають пункти прийому вантажів, тобто: найбільш ранній момент часу, коли вантаж може бути доставлений в пункт j – eb_i, дозволений інтервал прибуття

з вантажем в пункт j – $eb_i + \Delta_i$, найбільш пізній момент виконання замовлення – ef_i. Транспортні пункти, які є відправниками вантажів, характеризуються не тільки моментами виникнення і скасування замовлення, а й *циклічністю таких моментів*. Замовлення p, які періодично виникають в пункті i, мають зміст вантажопотоків до пункту j розміром $q_{i.j}$, називатимемо *однорідними* і позначатимемо індексом p_l. Між моментами виникнення чергових однорідних замовлень існує період – такт $0 \le \tau_{i.l} < \infty$, який є випадковою величиною. Якщо $\tau_{i.l} = 0$, то відправлення вантажів з i-го пункту не обмежується директивними термінами, якщо $\tau_{i.l} = \infty$, то замовлення в цьому пункті є одноразовим. Усю множину замовлень P відображає орієнтований граф $A(G,U)$, де G – множина вершин, $\{g_0, g_1, g_2, \ldots, g_p, g_{p+1}\}$, що символізують транспортні пункти. Вершина g_0 – фіктивна, символізує формальний початок вантажопотоків. Вершина g_{p+1} – фіктивна, символізує кінець планового циклу тривалістю T. U – множина дуг, які відображають заплановані потоки вантажів від i-ї до j-ї вершини. Дуги графа A – зважені. Кожній дузі надано вагу q_{ij} – обсяг перевезення, який потрібно здійснити. Якщо існує замовлення, то воно відображається у графі A дугою ваги $q_{i.j}$>0. Усі ж інші ваги відображають дугами з вагою $-\infty$. Граф A побудовано без петель, тобто так, що, якщо у ньому мали б бути дві вершини g_h і g_x, між якими є дуги, такі, що $q_{h.x} > 0$ і $q_{x.h} > 0$, то до них додано третю g_{h+1}, таку, що $q_{h.x} > 0$, $q_{x.h} = 0$, $q_{x.h+1} > 0$. Таким чином петлі ліквідовано завдяки дублюванню вершин. Між будь-якими двома замовленнями p_x та p_y може бути встановлено відношення переваги, яке може бути формалізоване у вигляді додаткової дуги з нульовою вагою. Такими ж дугами з нульовою вагою пов'язана вершина g_0 з тими вершинами, з яких починаються дуги з вагою $q_{x.h} > 0$, тобто $q_{0.x} = 0$ для усіх x, що $q_{x.h} > 0$, h=1…p, а також $q_{y.p+1}$ =0 для усіх y, що $q_{x.y} > 0$, для усіх x=1…p. У загальному формулюванні задачі такого відношення немає. Кожне замовлення може бути виконане впродовж періоду T з виконанням такої кількості поїздок, що кратна співвідношенням T/τ_i та T/τ_j.

До процесу перевезення може бути задіяно k АТЗ. Вони повинні працювати синхронно, виконуючи по декілька замовлень послідовно. Це означає, що у графі A потрібно знайти k ланцюгів, які починаються у вершині g_0, проходять через вершини графа, які стосуються наявних замовлень і закінчуються у вершині g_{p+1}. У даному варіанті задачі марний пробіг не допускається. Тому шукані ланцюги мають проходити тільки по тих вершинах, для яких $q_{x,y} > 0$. Якщо ланцюг доходить до вершини y, а далі нема жодного шляху у графі A з невід'ємною, або ненульовою вагою, то ланцюг при цьому прямує до вершини $p+1$. Транспортний цикл для цього АТЗ вважатимемо завершеним, незважаючи на те, що резерв часу на виконання інших, ще не виконаних замовлень є. З іншого боку, якщо марний пробіг допускається, то послідовності виконаних замовлень можуть бути довшими, однак втрата часу тут може бути неспівмірна з втратою коштів на марний пробіг.

Задачі такого типу можна розв'язувати за одним таких критеріїв.

1. Максимальна швидкодія ТП.
2. Мінімальні часові затримки виконання замовлень.
3. Мінімальні простої парку АТЗ.
4. Максимальний обсяг виконаної транспортної роботи.

Перший критерій означає, що потрібно знайти найкоротший критичний ланцюг у графі A. Однак, усі інші ланцюги, які відображатимуть роботу автомобілів, що входять в групу k, будуть недосконалими, тобто не відповідатимуть довжині критичного. А це означає, що автомобілі даної групи не використовуватимуться однаково ефективно. Критерії 2 і 3 за змістом своїм є аналогічними. Крім того, їх можна виразити як мінімальна сумарна зайнятість транспортних засобів при умові виконання максимальної кількості замовлень і рівномірного розподілу зайнятості автомобілів впродовж планового періоду T. В зв'язку з цим використовується критерій максимальної транспортної роботи, який фактично означає максимальну кількість виконаних замовлень. Задача в такому формулюванні є схожа на типову задачу декількох комівояжерів з декількома відмінностями [151].

1. Період T не є наперед заданою величиною (не шукається найкоротше його числове значення).

2. Допускається багаторазове, навіть циклічне проходження автомобілем будь-якого транспортного пункту, так само, як виконання замовлень по частинах.

3. Довжина будь-якої ланки будь-якого ланцюга є величиною змінною. Вона залежить від послідовності виконання замовлень. Адже замовлення можуть виконуватись в обмежений період, отже одне і теж замовлення, яке не розпочато вчасно, може бути виконано із затримкою.

4. Кількість заданих АТЗ може не дорівнювати кількості реально задіяних до перевезення.

Алгоритм розв'язку задачі є таким. Відомі алгоритми розв'язання ЗК, відповідно, також не є цілком придатними для пошуку гарантованого, або приблизного розв'язку. Тому було використано такий комбінований алгоритм [200]. Введемо змінну $x_{i.j}$ – кількість їздок, які виконуються від вершини g_i до вершини g_j за період T $x \in \{0,1,...,Z_j\}$. При цьому, якщо $Q_{i.j} = 0$, то й $x_{i.j} = 0$.

Обмеження на змінні є аналогічні до виразу (4.17), але враховують реальну кількість вершин у циклі:

$$\sum_{j=1}^{n} x_{i.j} - \sum_{i=1}^{n} x_{i.j} = 0, \tag{4.26}$$

яке означає, що кількість потоків, які входять у будь-яку вершину, крім кінцевої $n+1$, дорівнює кількості потоків, які виходять з цієї вершини; інші обмеження є такі ж як і (4.18), (4.19).

Обмеження на сумарну тривалість усіх операцій циклу:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(t_{i.j} + h_{i.j}\right) \cdot x_{i.j} \le t_{\Sigma}, \tag{4.27}$$

яке означає, що незалежно від кількості одночасно задіяних в процесі АТЗ, сумарна тривалість операцій не повинна перевищувати деякого значення t_{Σ},

яке задають в межах від деякого наперед великого значення до мінімального, при якому існує розв'язок задачі.

Величина $h_{i.j}$ – це затримки/випередження у виконанні замовлення, яке обчислюємо за виразом:

$$h_{i.j} = \begin{cases} \theta_{0.i}^{b.l+1} - eb_{i.j}, \text{ якщо } eb_{ij} < \theta_{0.i}^{b.l} \\ eb_{i.j} - \theta_{0.i}^{e.l}, \text{ якщо } \theta_{0.i}^{b.l+1} - eb_{i.j} \end{cases}, \tag{4.28}$$

де $\theta_{0.i}^{b.l} = (l-1)\cdot\tau_{0.i}$, $\theta_{0.i}^{e.l} = (l-1)\cdot\tau_{0.i} + \Delta_{0.i}$ – відповідно, момент початку і закінчення виконання замовлення. Критерій – максимальна кількість замовлень, яку можна виконати впродовж періоду T:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} x_{i.j} \to \max . \tag{4.29}$$

Спочатку задаємо наперед велике значення величини t_{Σ}. При такому значенні цього обмеження функція (4.29) набуде максимально можливого значення можливої кількості замовлень, які можна виконати в період T:

$$Z = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left[\frac{Q_{i.j}}{q_k}\right], \tag{4.29}$$

де квадратні дужки означають ділення без остачі.

Вирази (4.26)-(4.29) показують, що ця задача має вигляд ЛП. Для її розв'язання застосовано градієнтний метод [196]. Розв'язок задачі при $t_{\Sigma} = t_{\max}$ є гарантованим, ініціюючим при заданому R. Він є забезпечений тим, що обмеження (4.27), практично, відсутнє. Фактично отриманий розв'язок є графом $A(G,U)$, у якому усі дуги U збережені. Цей граф може містити замкнуті контури, тому, згідно з відомою теоремою про змішані графи [170], однозначного оптимального за швидкодією розкладу за таким графом побудувати неможливо. Якщо ж є часове обмеження на виконання транспортного циклу, тобто допустима максимальна тривалість періоду $T \le t_{\max}$, то такий однозначний розклад не має змісту, оскільки, у якому б порядку не виконувались замовлення, усі умови оптимальності задачі виконуються. Період T в

цьому графі є довільною величиною в цьому випадку. Якщо тривалість t_{max} зменшити, то розв'язок задачі зміниться. Для цього у графі A буде знайдено такий підграф A', у якому відсутні замкнені цикли і за ним можна побудувати однозначний розклад виконання деякої частини замовлень. Для того, щоб вибрати дуги графа A, які відповідають таким замовленням, використаємо показник h за виразом (4.28). Вибравши з графа A такі дуги, виконуємо його впорядкування, тобто шукаємо критичний шлях і паралельні до нього ланцюги вершин за методикою, викладеною в пункті 4.2. Інший підграф $A'' = A / A'$ залишається без змін, тобто для нього однозначного розкладу виконання замовлень не потрібно, оскільки умови задачі виконуються. Саме граф A'' є об'єктом впорядкування на наступних кроках алгоритму. Алгоритм побудови розкладу є ітераційний. Зміст кожної ітерації полягає в тому, щоб упорядкувати невпорядковану частину графа вантажопотоків, якщо таку вдалося знайти згідно з виразом (4.27). Якщо ж жодної дуги, що відповідає умові (4.28), нема, то t_Σ більше зменшувати не можливо, отже розклад, для якого виконується максимальна кількість замовлень при дотриманні гранично мінімального терміну виконання усіх замовлень з врахуванням їх дозволеної періодичності, знайдено. Приклад побудови такого розкладу показано на рис. 4.10. Тут представлено використання алгоритму на тестовій моделі. Було взято до розгляду граф, який містить 6 вершин, між кожною парою яких є дуга. Петлі у графі відсутні. Нульова і сьома вершини графа є фіктивними. Вони означають формальний початок і завершення циклу. Задано матриці $t_{i.j}$, $Q_{i.j}$, $eb_{i.j}$, ef_i, Δ_i. Вантажності автомобілів – q_k. На рис. 4.10 показано приклад змін в структурі загального транспортного процесу для випадку, коли задіяно R=5 транспортних засобів. Максимальна кількість транспортних засобів, які одночасно задіяні до перевезення – R=10. Максимальне значення сумарної тривалості перевезень – t_Σ=500 год. Кожна схема – це є підграф загального графа.

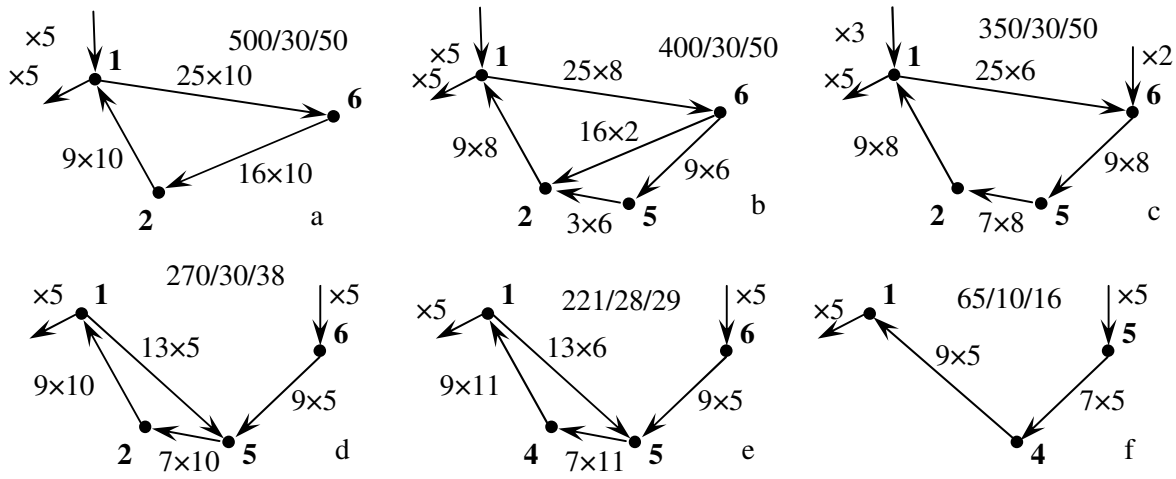


Рисунок 4.10 – Моделювання зміни структури транспортних циклів під впливом обмеження сумарної тривалості виконання замовлень

Вершини графів – це є транспортні пункти $g_1 \ldots g_6$, а дуги – це є циклічні потоки автомобілів з вантажами. Над кожною дугою вказано її вага – $\bar{t}_{i.j} \times z_{i.j}$. Наприклад, на схемі 4.10 а дуга $q_{1.6}$ має вагу 25×10. Це означає, що середня тривалість доставки вантажів з пункту 1 до пункту 6 становить 25 годин і здійснюється вона 10-и кратно. Оскільки на вході в таку схему є 5 транспортних засобів і стільки ж є на виході, то, очевидно, що кожен з них робить по два цикли. Максимальна кількість циклів, яка досягнута тут як критерій, становить 30. Як видно зі схеми, усі її операції є синхронними, що забезпечує мінімум простоїв транспорту в очікуванні готовності відправки. Максимальне значення сумарної тривалості перевезень – t_Σ=500 год. Характеристики такої схеми подано у верхньому правому кутку рисунку: $t_\Sigma / Z / T$. Тривалість планового періоду T знайдена як довжина критичного шляху в графі: 1–6–2–1. Виокремлений підграф однозначно визначає розклад роботи транспортних засобів. Уже на наступному рисунку 4.10.b обмеження на сумарну тривалість операцій приводять до скорочення кількості циклів 1–6–2–1 і додавання циклів 1–6–5–2–1. Розклад операцій стає більш напруженим, оскільки потрібно узгоджувати потоки автомобілів, які зливаються в пункті g_2. Тут виникатимуть затримки часу. Тривалість планового періоду залишається такою ж. Подальше скорочення параметра t_Σ як обмеження задачі приводить до

зменшення кількості циклів, отримання більш напруженого розкладу роботи автомобілів і до скорочення тривалості циклу. В кожній з поданих схем розклад є однозначним. Зрештою, на рис.4.9f ми можемо побачити лінійну транспортну схему без замкнених циклів. У такій схемі бажаний розклад без простоїв транспортних засобів і вантажів побудувати є дуже складно через те, що тривалості суміжних операцій і величини $eb_{i,j}$ є, найчастіше, некратними [182]. На рис. 4.11 показано залежність максимальної кількості замовлень, які можуть виконати транспортні засоби у циклічній транспортній системі від дозволеної максимальної сумарної тривалості процесів. Як видно із залежності, максимальна кількість замовлень, яку можуть виконати автомобільні транспортні засоби, які взаємодіють у транспортній системі, асимптотично наближається до максимально можливого для даної системи значення при розширенні обмежень на сумарну тривалість перевезень.

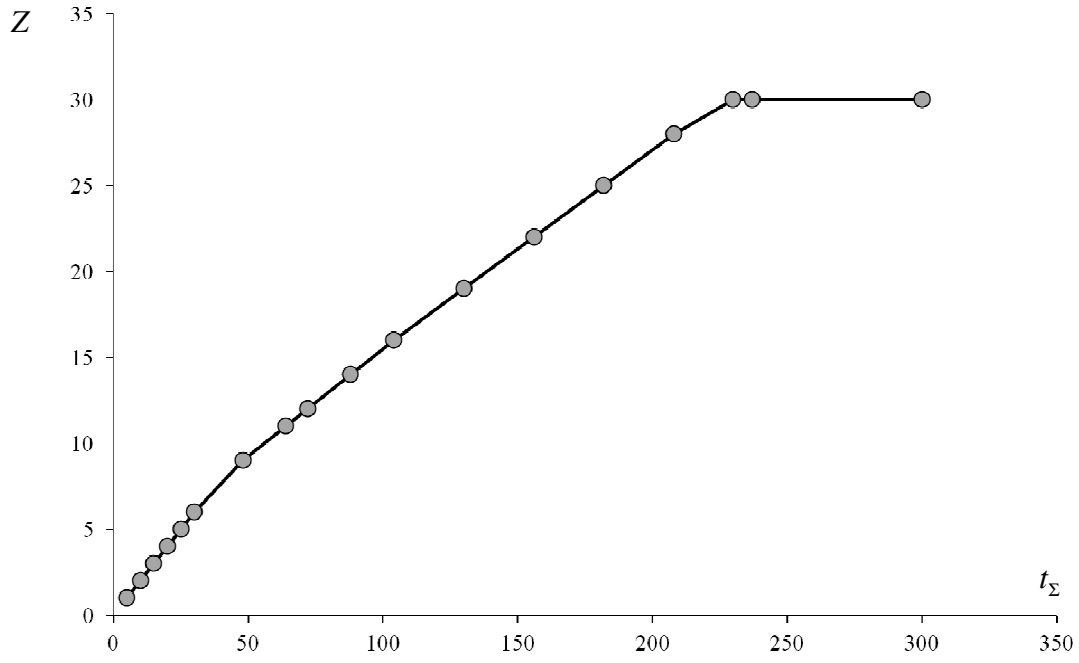


Рисунок 4.11 – Залежність сумарної кількості виконаних замовлень від дозволеної тривалості ТП для замовлень, які періодично виникають

Це пов’язано з тим, що у малих транспортних системах (об’єднують 2-3 кільцевих маршрути), які на графіку відображені точками зі значенням t_Σ

=5…50 виконуються короткі за тривалістю замовлення, а розклад їх виконання є напруженим і допускає чимало простоїв. При збільшенні t_Σ понад 50 і до 210 год. кількість замовлень, які виконуються за один цикл, зростає пологіше. Тут беруться вже до уваги складніші за виконанням замовлення, які в менших системах ігнорувались. Зауважимо, що такий вид залежності не змінюється при зміні кількості задіяних транспортних засобів. Подібні дослідження проведено і з додатковими обмеженнями на кількість замовлень, які можуть стосуватись одного транспортного пункту. Зокрема, якщо кількість заїздів в кожен пункт не більше одного, то задача набуває змісту задача комівояжера з багатьма маршрутами [171].

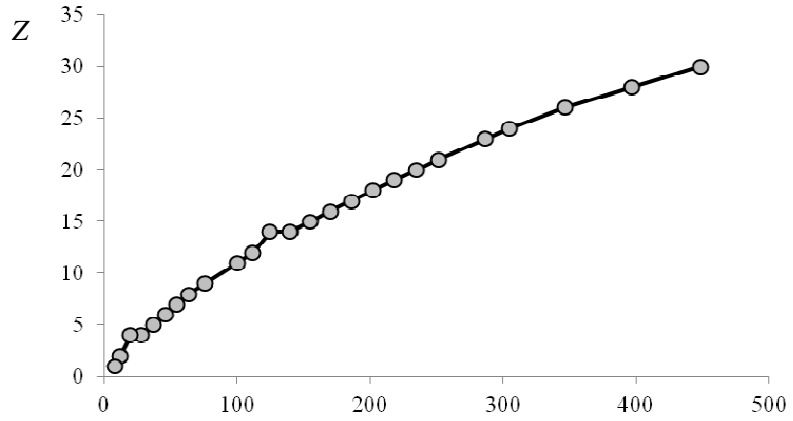


Рисунок 4.12 – Залежність сумарної кількості виконаних замовлень від дозволеної тривалості циклу для одноразових унітарних замовлень

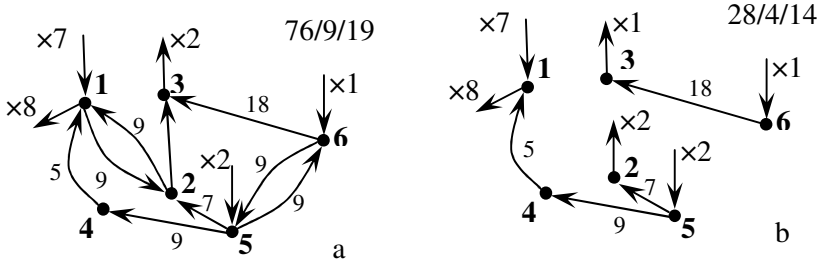


Рисунок 4.13 – Моделювання зміни структури транспортних циклів під впливом обмеження сумарної тривалості виконання замовлень при одноразовому замовленні у кожному пункті

Тут цю задачу розв’язано за викладеною вище методикою. В результаті отримано залежність максимальної кількості циклів від дозволеної сумарної тривалості виконання замовлень за аналогією. Як видно з рис. 4.12, ця залеж-

ність також асимптотично наближається до сталого значення Z. Залежність також не залежить від кількості наявних автомобілів *R*. Більш того, реальна кількість автомобілів задіяних в процесі є меншою, як правило, від заданої. На рис. 4.13 а бачимо, що до перевезення задіяно 10 транспортних засобів. Однак за кількістю дуг, які виходять з початкових вершин, видно, що кількість засобів, які реально використовуються є 4. Кількість замовлень, що виконуються – 9. Шляхом обмеження на сумарну тривалість процесів перевезення було досягнено схеми, що на рис. 4.13 b. Тут з десяти транспортних засобів використовується 3. Кількість замовлень – 4. Якщо у цьому випадку вдалося скоротити сумарну тривалість циклу в більш, як 2,7 рази, то максимальна тривалість циклу зменшилась лише на 35%. Задіяна кількість АТЗ впливає лише на максимальне значення t_Σ, за якого можна отримати розв'язок задачі (рис.4.14). Важливе значення в організації розкладу роботи АТЗ в середніх і великих ТС має частина тривалості ТП, яку ще називають тактом. Ця величина є мірою зібраної інформації, оскільки прогноз вантажопотоків залежить від тривалості періоду прогнозування (рис.4.15). Крім того середні і великі транспортні системи можна розрізняти ще й за періодом прогнозування, крім відомих ознак [89].

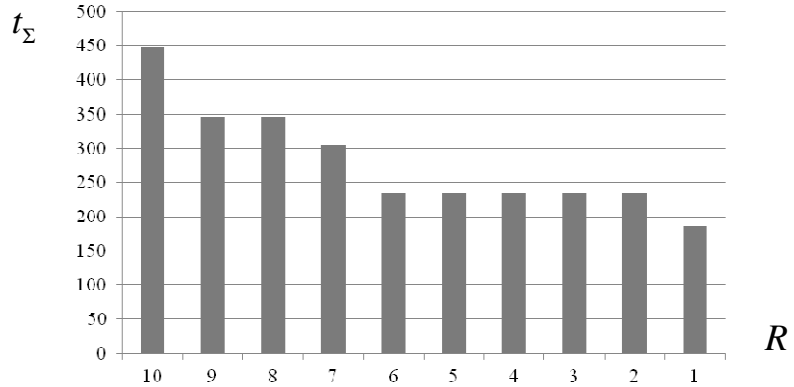


Рисунок 4.14 – Залежність максимальної сумарної тривалості операцій циклу від наявних АТЗ

У великих ТС значення інформаційного забезпечення особливо зростає, оскільки автомобілі взаємодіють у складних транспортних циклах, обслуговується більша кількість транспортних пунктів.

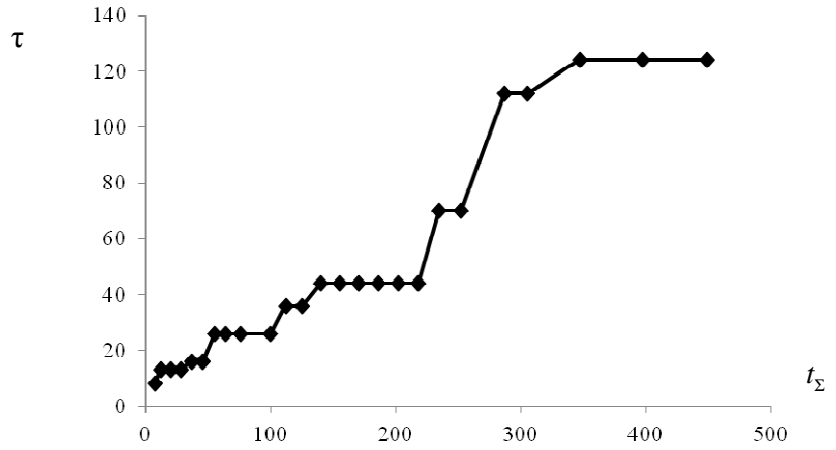


Рисунок 4.15 – Залежність тривалості планового періоду / періоду прогнозування від максимальної сумарної тривалості операцій

Тому кількість інформації для таких систем є визначальною ознакою. Як видно з рис. 4.15, спостерігається якісний перепад від тривалості циклу до 50 годин, який характерний для малих і середніх систем, до великих систем з тривалістю циклу понад 110 годин.

4.5 Побудова циклічного розкладу взаємопов'язаних АТЗ з мінімальними сукупними затримками процесу

Ставилась мета розробити методику і відповідний алгоритм побудови розкладу роботи взаємопов'язаних автопоїздів на МТМ, при циклічному характері вантажопотоків, який був би максимально наближеним до реальних виробничих умов – з одного боку, та придатним до автоматизації процесу його побудови. Цей розклад має базуватись, перш за все, на оптимальних транспортних циклах. Оптимізація ТП має вигляд такої задачі. Дано МТМ, що складається з n пунктів, між деякими з яких є безпосереднє сполучення, яке можна оцінити середнім часом $t_{ij}, i, j = \overline{1,n}$ переміщення АТЗ. Якщо сполучення немає, то $t_{ij} = +\infty$. Цю мережу можна відобразити у вигляді графа $G(Q,V,U)$, де $Q \subset \{q_0, q_1 \ldots q_n, q_{n+1}\}$ – множина вершин, які відображають операції стосовно транспортних пунктів, включно з двома фіктивними q_o – формальний початок транспортного циклу, q_{n+1} – завершення циклу; V, U – множина ребер та дуг, які відображають часові зв'язки операцій [170]. Часовий зв'язок $t_{0,j}$ означає обмеження на тривалість циклу утворення гурту вантажів, готових до відправлення, а $t_{i,n+1}$ – обмеження на тривалість циклу доставки вантажу

до *i*-го пункту. Впродовж деякого періоду $T=t_{0.5}$ є відомий прогноз потенційних вантажопотоків на цій мережі у вигляді матриці $\|q_{i.j}\| \geq 0$, де *i* – номер відправника, *j* – номер споживача вантажів. При цьому розмір гурту для відправлення є не меншим, ніж вантажність заданих транспортних засобів: $q_{i.j} \geq q_н$. В реальних виробничих умовах відправлення вантажів може бути здійснено одним з трьох способів: 1) без складування вантажів, за системою «саме вчасно»; 2) з використанням достатньо великого складу, що дає змогу виконувати завантаження у довільний час, коли автомобіль прибуває у пункт відправлення; 3) з використанням обмеженого складу, в цьому разі вантажі можуть перебувати в пункті відправлення впродовж обмеженого періоду. Для першого випадку існують достатньо ефективні методи побудови детермінованих, точних розкладів при такому порядку відправлення вантажів [203]. Другий спосіб є тривіальним стосовно поставленої мети. Адже затримки доставки вантажів не можуть бути обмеженнями для руху автомобілів, тому що вони можуть прибувати і відбувати з транспортного пункту у будь-який момент часу. Також декілька транспортних засобів, які обслуговують задані вантажопотоки, не є пов'язані в часі. Найбільший інтерес представляє третій спосіб. Він має окреме формулювання, при якому кожен вантажопотік може виникнути періодично зі сталим, або змінним тактом, та є обмеженням для часу прибуття АТЗ під завантаження. До умов задачі додаються такі дані: множина тактів вихідних вантажопотоків $\{\tau_{0.1},\ldots\tau_{0.n}\}$, та інтервалів часу, коли ці вантажопотоки можуть зароджуватись впродовж кожного циклу: $\Delta_{i.j}$. Виходячи з циклічного характеру джерел вантажопотоків, можна обчислити директивні моменти часу, коли виникає готовий до відправки гурт вантажів, а саме,

- момент початку:

$$\theta_{0.i}^{b.k} = (k-1)\cdot\tau_{0.i}, \tag{4.30}$$

- момент закінчення:

$$\theta_{0.i}^{e.k} = (k-1)\cdot\tau_{0.i} + \Delta_{0.i}, \tag{4.31}$$

де *k* – номер циклічного періоду, коли виникає гурт вантажів для перевезення; *i* – номер пункту відправлення. Згідно з (4.30) і (4.31) завантаження і доставка вантажів може початись не раніше термінів початку $\theta_{0.i}^{b.1}, \theta_{0.i}^{b.2}, \ldots\theta_{0.i}^{b.k}$, та завершення $\theta_{0.i}^{e.1}, \theta_{0.i}^{e.2}, \ldots\theta_{0.i}^{e.k}$ в *i*-му пункті. Якщо АТЗ встигає після $\theta_{0.1}^{b.l}$ і до моменту

$\theta_{0.1}^{e.l}$ l-го періоду прибути під завантаження у i-й пункт, то його простоювання не буде. Якщо ж момент прибуття автомобіля $eb_{ij} < \theta_{0.i}^{b.l}$, або $eb_{ij} > \theta_{0.i}^{e.l}$, то завантаження потрібно очікувати, і це супроводжуватиметься затримками:

$$d_i^{l+1} = \theta_{0.i}^{b.l+1} - eb_{i.j}, \tag{4.32}$$

$$d_i^l = eb_{i.j} - \theta_{0.i}^{e.l}. \tag{4.33}$$

Прибуття АТЗ під завантаження залежить від того, яку попередню транспортну роботу він виконував, як він скоординований з іншими транспортними засобами, тобто від розкладу виконання транспортно-технологічних операцій. Для того, щоб його скласти, сформульовано таку задачу математичного нелінійного програмування. Якщо у графі G можна знайти декілька різних шляхів, які починаються з вершини q_0, проходять через його проміжні вершини так, що повторно заходять в одну і ту ж вершину тільки по іншому зв'язку і завершуються у вершині q_{n+1}, так, що усі шляхи відображають задані вантажопотоки $q_{i.j}$, то існують, очевидно, такі шляхи, які забезпечують мінімальне значення критерію – затримок АТЗ, які беруть участь в циклі:

$$D_\Sigma = \sum_{i=0}^{n+1} d_i, \tag{4.34}$$

Для пошуку шляхів у графі G використано змінні $x_{i.j}$ – кількість їздок, які автомобіль з вантажністю q_n повинен зробити від i-го до j-го пункту, $x_{i.j} \subset \{0,1\}$, виконуючи перевезення $q_{i.j}$. За значенням бінарної змінної x_{ij} можна визначити усі шляхи від фіктивної 0-ї до n+1-ї вершини графа. Обмеження: тривалість будь-якого циклу має бути не більшою, ніж час прогнозування:

$$\sum_{i=0}^{n+1}\sum_{j=0}^{n+1} t_{i.j} \cdot x_{i.j} \le T. \tag{4.35}$$

Обмеження на змінні – такі ж як (4.32), (4.33). Крім того:

$$x_{i.j} \ge \frac{q_{i.j}}{q_n}, \tag{4.36}$$

обмеження на мінімальну кількість поїздок від *i*-го до *j*-го споживача, яка забезпечить виконання відомого транспортного завдання (обсягу перевезень).

В результаті розв'язання задачі з обмеженнями (4.32)-(4.33) можна отримати оптимальну послідовність операцій доставки вантажів за критерієм (4.34). Числове значення цього критерію залежить тільки від кількості ланцюгів операцій, черговості їх виконання, кількості паралельних ланцюгів, що визначається вибором доцільного фронту АТЗ *R*. Така велика кількість рішень, які потрібно прийняти для оптимізації циклу є причиною складності алгоритму, який кваліфікують, у таких випадках, як *NP*-складна задача [170]. Для отримання гарантованого точного оптимуму було застосовано інтерактивний підхід, а також неформальні ознаки оптимальності.

Алгоритм складається з таких кроків.

1. Початкові дані: матриці $\|q_{ij}\|$, $\|t_{ij}\|$, та вектори $\left(\theta_{0.i}^{b.k}\right)$, $\left(\theta_{0.i}^{e.k}\right)$. Задано мінімальне значення часу виконання циклу *T*, максимально можлива кількості АТЗ, залучених в процесі – *R*.

2. Знайти значення змінних x_{ij}, для яких виконуються умови (4.35)-(4.36). Для цього можна застосувати метод математичного програмування, наприклад градієнтний [171]. Критерій обчислюють за виразами (4.33)-(4.34).

3. Визначити числові значення моментів найбільш раннього початку виконання операцій перевезення eb_{ij}, та найбільш раннього їх завершення ef_{ij}. Приймають початкове значення k=1. Якщо момент початку будь-якої операції є менший, ніж будь-яке число з інтервалу $\left[\theta_{0.j}^{b.k};\theta_{0.j}^{e.k}\right]$, то переходять до наступного значення *k.*

4. Повторити крок 3 для нового значення *k*. Якщо умова моменту початку операції виконується, то обчислюють часову затримку виконання операції за виразом (4.33), або (4.34).

5. Якщо R>1, то визначити усі ланцюги, які беруть початок у вершині q_0 і завершуються – у q_{n+1}. Обчислюють тривалість кожного ланцюга, як окремого транспортного циклу, виходячи з того, що зміщення в часі, а отже збільшення часової затримки виконання будь-якої транспортної операції у цик-

лічній системі приводить до відповідного зменшення часової затримки виконання іншої, з нею пов'язаної операції. Тому можна застосувати для обчислення дійсної тривалості циклу вираз:

$$T_{\partial.g} = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} t_{i.j.g} + d_{i.g} \,, \tag{4.36}$$

де i=1…m – номери операцій, які входять в знайдений g-й ланцюг.

Серед усіх знайдених ланцюгів визначають той, для якого $T_{\partial.g}$ – максимальне. Порівнюють це значення із заданим директивним терміном циклу T. Якщо $T_{\partial.g}$>T, то переходять до кроку 1 і збільшують число R на одиницю. Якщо ні – до кроку 6.

6. Обчислюють такі значення моментів початку виконання транспортно-технологічних операцій, при яких вони відповідатимуть умові їх співвідношення з початком відправки вантажів. Ці моменти фактично визначають шуканий розклад оптимального транспортного циклу.

Приклад побудованого розкладу у вигляді циклограми обслуговування чотирьох вантажопотоків $q_{1.2}$, $q_{2.1}$, $q_{2.3}$, $q_{3.4}$, при R=1 і при циклічному характері виникнення вантажопотоків, подано на рис. 4.16.

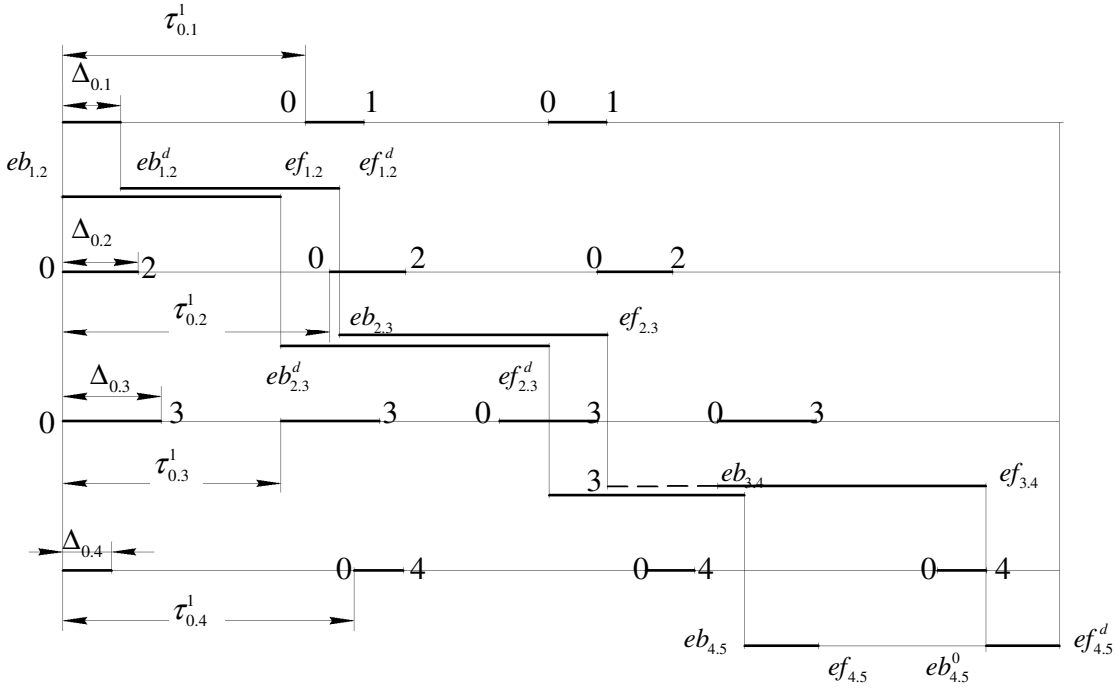


Рисунок 4.16 – Циклограма оптимального ТП одного АТЗ

На схемі подано два аналогічних ланцюги операцій, один з яких не має прив'язки до циклів виникнення вантажопотоків, які задані тактами $\tau_{0.i}^{k}$. Інший – заданий моментами початку операцій, що скоординовані відносно цих циклів. Ці моменти на рис. 4.16 позначені індексом *d*. Ланцюг, зміщений праворуч за віссю часу, не є нерозривним, на відміну від свого аналога. З рисунку видно, що операції першого ланцюга можна класифікувати як такі, для яких $\theta_{0.i}^{b.k} < eb_{i.j} < \theta_{0.i}^{e.k}$. Вони можуть виконуватись без затримки, з резервом часу $E = \theta_{0.i}^{e.k} - eb_{i.j} > 0$. На рис. 4.16 це – операції 2 і 3. Інші – із затримкою $D = eb_{i.j} - \theta_{0.i}^{b.k} < 0$. Незалежно від того, як зміщати в часі моменти початку операцій, сумарне значення *E*+*D* – *const*. Отже знайдений розклад дає гарантований оптимум (4.34) і його не можна покращити додатковими коректуваннями. Завжди буде такий варіант розкладу, для якого $D \to 0$, а $E \to \max$. Отримані оптимальні цикли дають змогу обґрунтувати конечний обсяг інформації про майбутні замовлення. Так, з рис. 4.16 видно, що для заданого розкладу достатній час прогнозу для пункту 1 – $\tau_{0.1}$, 2 – 2· $\tau_{0.2}$, 3 – 3·$\tau_{0.3}$; 4·– 4·$\tau_{0.1}$.

4.6 Динамічна маршрутизація з врахуванням наявних інформаційних потоків на мережі

Класично, динамічна маршрутизація полягає в тому, що впродовж деякого періоду T_{pr} зроблено прогноз замовлень на перевезення вантажів на заданій МТМ. 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 [152]. 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 [194, 204]. МТМ 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,… 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:

а) надійшли нові замовлення з часовими вікнами, які перетинаються з горизонитом планування;

б) відмінено прогнозоване замовлення;

в) збільшився / зменшився прогнозований час транспортування t_{ij}, де *i, j,* відповідно, пункт відправки і приймання вантажу;

г) АТЗ 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 [206, 207]. Реакція на такі події перевізників може бути такою, що приймається, або відхиляється одне з можливих рішень:

а) відмовити у виконанні нових замовлень;

б) проігнорувати скасовані замовлення;

в) змінити послідовність виконання замовлень;

г) змінити кількість транспортних засобів на маршрутах, у тому числі, з врахуванням резерву.

Закономірно виникають два актуальні питання:

- чи вплинуть зміни до попереднього замовлення на його якість, яка досягнута раніше;

- як може вплинути на процес побудови/корекції оптимального розкладу і маршрутів наявність інформації про властивості планових та нових замовлень? Формулювання загальної задачі є подібним до задачі, викладеної в п.4.2. Основні особливості. Задано плановий період T_{pr}, який можна змінювати залежно від бажаної дальності прогнозування. Зміст кожного замовлення полягає в тому, щоб доставити унітарний гурт вантажів Q_{ij} від деякого пункту g_i до іншого g_j, $i, j = 1 \ldots n$, $n < p$. Оскільки $\bar{t}_i \le T$, 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 $t_{e.i}$ Отже, потрібно врахувати тривалість нульових пробігів, а також час руху між *i* та *j* пунк-

тами – $t_{i,j}$. 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. Ця задача пов'язана з часовим впорядкуванням робіт (замовлень) і розподілом їх між наявними АТЗ. Тому її можна віднести за відомими класифікаційними ознаками до задач складання циклічних унітарних розкладів для потокового виконання операцій проекту декількома засобами [198]. За складністю алгоритму пошуку задача динамічної маршрутизації відноситься до NP складних задач у сильному змісті. Тобто для неї існує недетермінований алгоритм пошуку успішного точного, або наближеного розв'язку за поліноміальний час [170]. Для його розроблення використано метод впорядкування змішаних графів, який описаний у п.4.2.

Якщо розглянути приклад тестової моделі (див. рис.4.4 а) – змішаний граф то зміст задачі також полягає у пошуку його безциклового варіанту (рис. 4.4 б, в). Якщо замовлення є незалежні, то, присутні, 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 (4.11) і служить для вибору конфліктного ребра з усієї множини заданих. Впорядкування змішаного графа приводить до побудови орієнтованого (див. рис. 4.4 б, в), у якому нема контурів додатньої ваги, і який однозначно представляє оптимальний за швидкодією розклад і маршрути.

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, за аналогією з класифікацією, поданою в [208]. 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. 4.17).

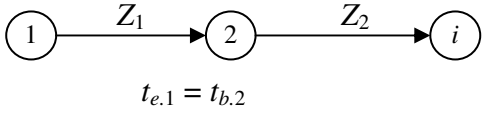


Рисунок 4.17 – Модель цілком сумісних замовлень

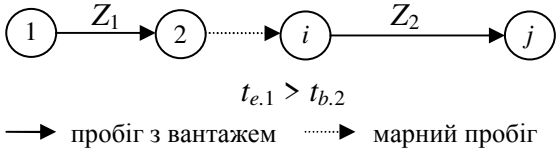


Рисунок 4.18 – Модель частково сумісних замовлень

Частково сумісними є такі замовлення, виконання яких приводить до необхідності марного пробігу і/або простою в очікуванні наступного завантаження (рис. 4.18). 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. 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 такі логічні вирази, які слідують з означень для замовлень *a, b, d*.

1. Якщо *a com b,* то *b inc a.*

2. Якщо *a com b,* і *b com d,* то *a pc d.*

3. Якщо *a com b,* і *a com d* то *b pc d.*

4. Якщо *a pc b,* і *a inc d*, то *d pc b.*

Це є початкові логічні залежності, на основі яких, використовуючи алгебру логіки, можна записати й інші логічні вирази, які поєднують замовлення у ЛЛ. Якщо замовлень, які можна включити в єдиний потік в загальній сукупності є декілька, то усю сукупність можна оцінити показниками:

- коефіцієнт сумісності замовлень, який визначаємо так

$$K_{com} = \frac{n_{com}}{n_{\Sigma}}, \tag{4.37}$$

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:

$$K_{p.com} = \frac{n_{\Sigma} - n_{\max.flows}}{n_{\Sigma}}, \tag{4.38}$$

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:

$$K_{inc} = \frac{n_{inc}}{n_{\Sigma}}, \tag{4.39}$$

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. По-

вертаючись до попереднього прикладу статичної задачі, можемо відмітити на початковому графі дугами відношення повної сумісності між вершинами, або відсутністю дуги чи ребра – повної несумісності (рис. 4.19). Якщо порівняти дану на рис. 4.20 модель з початковою на рис. 4.4 а, 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. 4.4 б. 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.

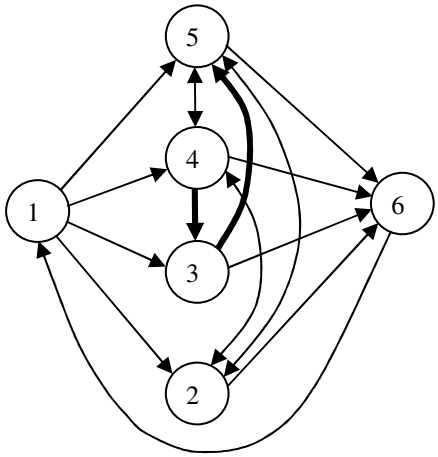


Рисунок 4.19 – Модель для складання розкладу із відміченими відношеннями повної сумісності замовлень (суцільна потовщена стрілка)

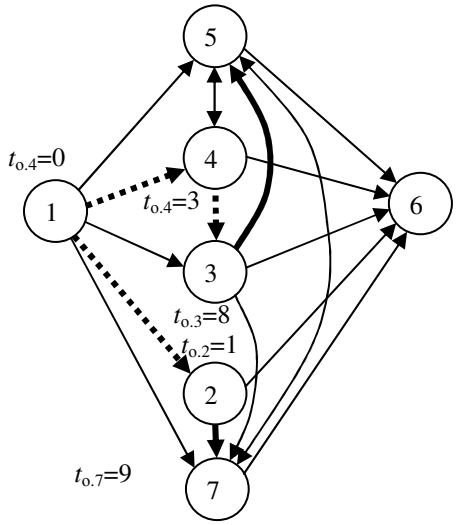


Рисунок 4.20 – Модель для коригування розкладу виконання замовлень після надходження незапланованого замовлення 7, кількість автомобілів m=2

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, відбу-

лись. 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. 4.4. В момент часу $t_{o.7}$=9 год. від початку реалізації плану перевезень два АТЗ розпочали рух по мережі. Один з них в момент $t_{o.4}$=3 год. уже виконав замовлення 4 і відправлений до наступного пункту для виконання завдання 3, яке, згідно з розкладом, завершилось в момент $t_{o.3}$=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.

Запропонований алгоритм було застосовано і для більшого масиву даних. На МТМ, яка відображає Львівську область тобто розміром, приблизно 150*150 км, розглядались замовлення на перевезення вантажів між містами регіону. Середня тривалість поїздки між містами становить 6,5±3,5 год. Парк АТЗ початково розташований в обласному центрі. Його чисельність становить 40 автомобілів. Такою ж є максимальна початкова кількість замовлень. Іншими словами, є можливість розподілити наявні замовлення між наявним парком так, що кожен АТЗ 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, част-

кової 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 міст області в проекті залучено 10, а з загальної протяжності доріг обласного і державного значення 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 λ=0,09 замовлень за годину [221]. Нові вимоги на перевезення є такими, що вони не змінюють прийняті раніше показники сумісності. Приймалось, що обсяг перевезення відповідає вантажомісткості кожного з наявних АТЗ у парку. Початкова оптимізація відомих замовлень виконувалась зі змінним горизонтом: 20…195 годин. Залежність кількості планових замовлень від тривалості прогнозування відображена на рис. 4.21. Ці дані отримано з транспортно-логістичного підприємства на основі відомості заявок. Кількість випадкових замовлень, які надходять у відведений період планування показано на рис. 4.22. При побудові розкладів і маршрутів з різним горизонтом планування властивості замовлень і розташування транспортних засобів у початковий момент залишались сталими.

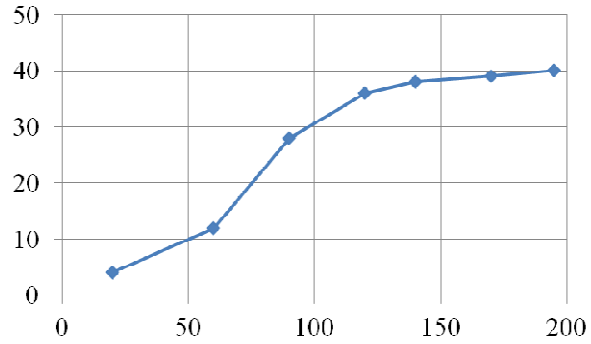


Рисунок 4.21 – Залежність кількості планових замовлень тривалості горизонту планування

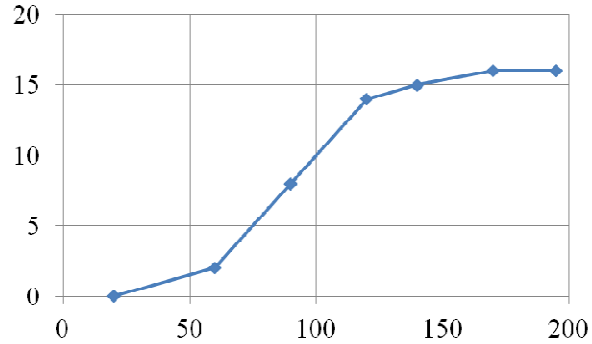


Рисунок 4.22 – Залежність кількості позапланових замовлень тривалості горизонту планування

Це стосувалось їх часових вікон, середньої тривалості та інших. У таблицях 4.1-4.3 подано результати оптимізації за двома методиками: при застосуванні запропонованої класифікації замовлень і групуванні їх, і за евристичним алгоритмом «гілок і меж» [159].

Таблиця 4.1 – Показники якості побудованих динамічних розкладів при початковій плановій кількості замовлень 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 з вантажем, 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 4.2 – 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 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 з вантажем, годин	265	246	–7,2%
Тривалість марного пробігу усіх автомобілів, годин	87	84	–3,4%
Тривалість простою усіх автомобілів, год.	24	17	–29,2%

У першому випадку на початкову модель накладаються обмеження, але вони є такі, що приймаються завідома найкращі рішення. Як видно з резуль-

татів 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.

Таблиця 4.3 – 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%

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 год. 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 ТП в цілому не змінилась, отже алгоритм привів до ущільнення розкладу при не-

значному зменшенні фактично виконаних робіт. Зменшення планового горизонту не впливає суттєво на якість розкладу. Адже співвідношення періоду планування T_{pr} і гарантованої тривалості ТП становить 1:8,8 та 1:5,4, тобто прогнозований час перевищує проектний щонайменше в 5,5 раз. Якщо проаналізувати дані таблиці 4.4, то тут стає очевидним, що алгоритм оптимізації з попередньою класифікацією є неефективним. Але у цьому випадку маршрутизація і складання розкладів – це, фактично, статичний ТП, оскільки незапланованих замовлень немає. Досліджено вплив кількості залучених АТЗ на тривалість ТП (рис. 4.23). 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.

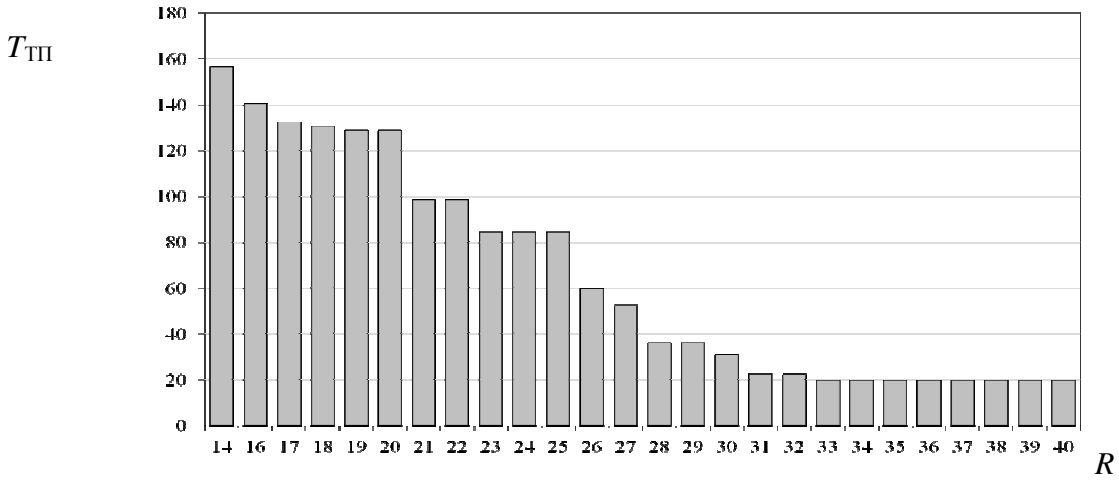


Рисунок 4.23 – Залежність мінімальної гарантованої тривалості ТП розміром 40 планових + 16 непланових замовлень від кількості АТЗ

При дослідженнях встановлена умова, що усі 52 замовлення мають бути виконані. Як видно рис. 4.23, збільшення числа автомобілів понад 31 не приводить до скорочення тривалості проекту, оскільки роботи розподілятимуться між наявними автомобілями, а їх продуктивність зменшуватиметься.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.

4.7 Оптимізація режимів роботи та відпочинку водіїв групи АТЗ з врахуванням їх взаємодії

Міжміські й міжнародні перевезення вантажів в Європі є складними через суворі обмеження, які накладені на режими роботи й відпочинку екіпажів транспортних засобів. Виконуючи такі поїздки, водії зобов'язані дотримуватись вимог Європейської угоди про роботу транспортних екіпажів [204]. Це приводить до безпеки на автострадах, – з одного боку, але, з іншого ускладнює ефективне використання основних засобів. Простої вантажівок, пов'язані з відпочинком, чи перервою у роботі водіїв, знижують продуктивність транспортних засобів, збільшують затримки в доставці вантажів. Дуже часто параметри маршрутів, по яких відбувається доставка, не співпадають з часовими обмеженнями розкладів руху. Трапляється також, що водії не мають змоги зупинитись для відпочинку через відсутність паркувальних місць, або доставити вантаж у терміни, які відведені споживачем послуг, так звані часові вікна. Усе це приводить до штрафних санкцій, або до втрати можливостей транспортних засобів.

Про проблему узгодження роботи автотранспорту з іншими обслуговуючими ланками при забезпеченні вчасної та якісної доставки вантажів в місце призначення згадується в багатьох сучасних працях. Спільним недоліком усіх відомих методів керування ТП є те, що у них були спроби формалізувати такі процеси транспортування, які важко формалізуються [209-216]. Тому використовувалась велика кількість змінних, а алгоритми були складними і не давали точного розв'язку. Завдання було спростити формулювання задачі, але при цьому враховувати, що буде застосована маршрутизація декількох транспортних засобів одночасно і врахована їх ефективна взаємодія. Ми виходили з того, що для виконання більшості замовлень на міжнародні вантажні перевезення перевізник може вибирати один з альтернативних маршрутів, які можуть відрізнятись довжиною, наявністю заторів і перешкод, отже швидкістю руху. Кожен з альтернативних маршрутів також може мати різну кі-

лькість транспортних пунктів, де може бути здійснені відпочинок, перерва, заправка, навантаження, чи розвантаження транспортного засобу.

Застосовано такі припущення.

1. Водії закріплені за транспортними засобами і не змінюють їх до кінця горизонту планування.

2. Тривалості операцій навантаження/розвантаження, митного контролю, руху вздовж заданої магістралі у визначений час є величинами, які можна з достатньою точністю передбачити.

3. Відпочинок водіїв може бути передбачений тільки у наперед визначених місцях, таких як фіксована стоянка, мотель, автозаправка. Вони не можуть виконуватись обабіч траси.

4. Оскільки маршрути, які розглядаються, не перевищують 500 км, то кожним транспортним засобом керує один водій.

Альтернативні маршрути можна урізноманітнити розробкою варіантів допустимих розкладів роботи і відпочинку водіїв. Їх отримано при застосуванні допустимих можливих опцій, як це зроблено в роботі [209]:

- поділу часу перерв керування;
- поділу часу міжзмінного відпочинку;
- зменшення часу щодобового відпочинку;
- збільшення щоденного часу керування.

Зауважимо, що останні дві опції зменшують час роботи водіїв на наступних транспортних циклах, тому варіанти розкладів відрізняються своїми перевагами і недоліками.

Для прикладу покажемо варіанти виконання вантажних перевезень за маршрутом Львів (Україна) – Бидгощ (Польща). На рисунку 4.24 показана карта маршруту з Google Map, на якій вказано три альтернативні траси, які проходять відповідно, по магістралях E40, E371, E372.

Рисунок 4.24 – Карта прикладового маршруту

Кожна з магістралей характеризується рівнем інтенсивності потоку і часом її проїзду, а також наявністю тимчасових перешкод у вигляді ремонтних робіт чи інших заторів. Виконання замовлення включає операції підготовчі в місці відправлення вантажівки, доїзд до місця завантаження, руху по окремих ділянках магістралі, миитних процедур, заправок паливом, розвантаження у пункті призначення. На рисунку 4.25 подано варіанти розкладів виконання замовлення при наявності одного водія. Варіант на рис. 4.24 а стосується проїзду по магістралях Е40, Е75, через Краків, Катовіце, Ченстохова, Лодзь. Тривалість навантаження у всіх варіантах – 2 години. Тривалість простою на митниці Краківць-Корчова – 4 години. У зв’язку з тим, що більшість часу простою на митниці – це очікування початку митних процедур, то даний на рис. 4.25а розклад включає першу частину розділеної перерви в керуванні – 15 хв. для того, щоб сумістити непродуктивні простої.

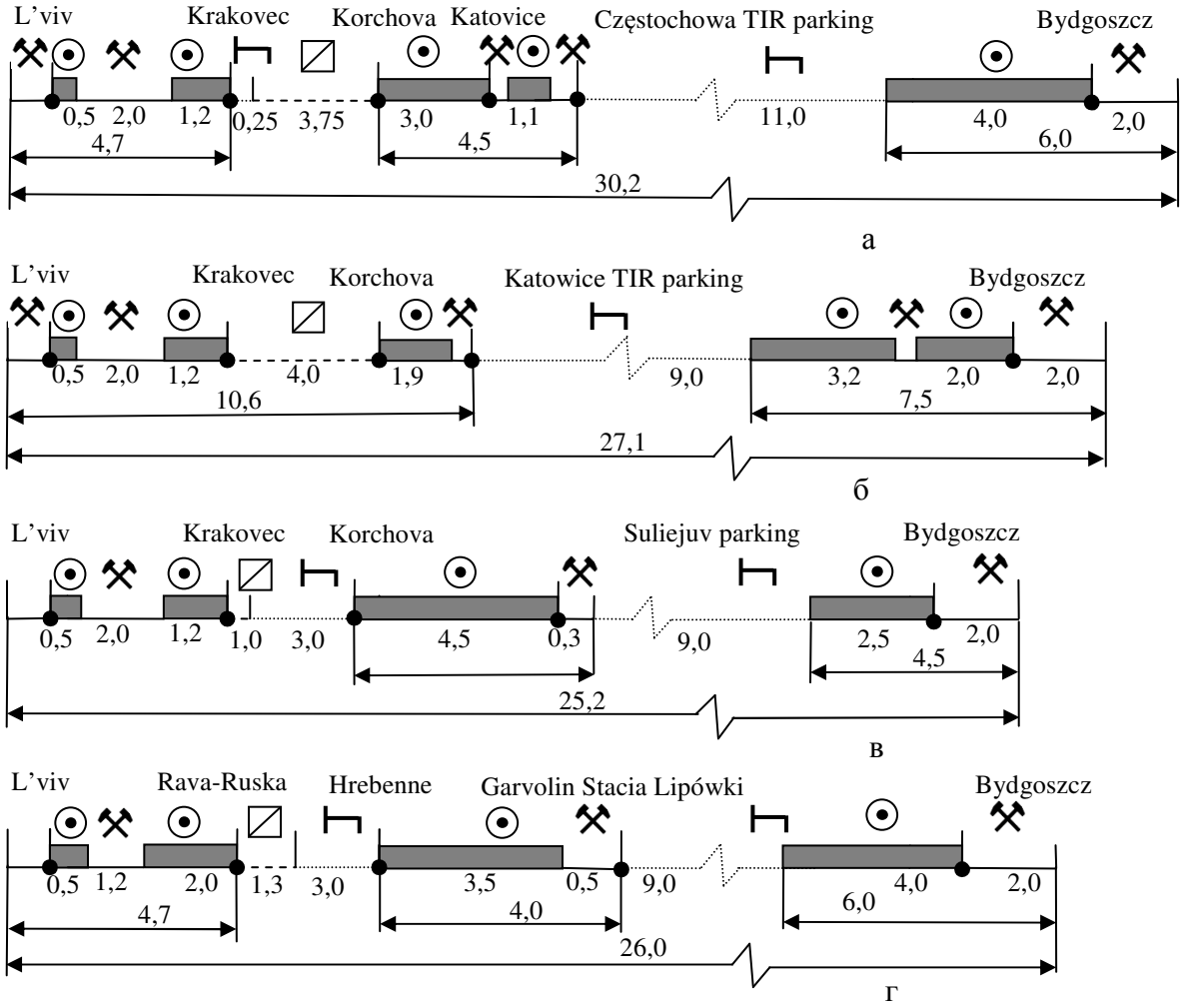


Рисунок 4.25 – Варіанти розкладів процесів

Час міжзмінного відпочинку тут не скорочується. Тривалість керування збільшена до 10,2 годин. Загальна тривалість циклу становить 29,5 год. Після цього циклу водій може виконувати наступний нескорочений робочий цикл. Такий самий маршрут, але виконаний за продовженою робочою зміною приводить до скорочення тривалості циклу на 2,5 години – 27,1 год. (рис. 4.25 б). Але у цьому випадку час виконання наступних замовлень, або ж руху до пункту наступного завантаження може бути довшим через необхідність застосувати вимогу ст. 6, п. 2. і 3 ЄУТР. Інші розклади також побудовані з дотриманням вимог і приписів (рис. 4.25 в). Якщо після виконання їздки А. Львів-Бидгощ для водія даного АТЗ поставити завдання інших рейсів, то вони будуть виконуватись з різним успіхом, який залежить від:

а) вибраного варіанту розкладу А;

б) вибраного варіанту наступного розкладу В.

Це дає підстави сформулювати і розв'язати задачу, яка полягає в комбінуванні можливих альтернатив, враховуючи такі умови:

а) наявну кількість вільних транспортних засобів;

б) допустимий горизонт планування;

в) наявні замовлення.

Задача формулюється так. На період часу T задана множина замовлень P, кожне p_i з яких можна виконати k альтернативними маршрутами і розкладами, які побудовані попередньо. Альтернативні варіанти виконання кожного із замовлень є несумісними в часі. Серед усіх альтернативних маршрутів і відповідних розкладів виконання одного і того ж замовлення потрібно вибрати, щонайбільше, один. Загалом потрібно знайти таку послідовність виконання перевезень заданою кількістю автотранспортних засобів m, при якій загальна тривалість проекту в рамках горизонту планування T, буде мінімальною, а усі обмеження режимів праці і відпочинку водіїв, а також щодо терміновості замовлень будуть дотримані. Фактично у цій задачі потрібно комплексно виконати такі дії:

а) розподілити наявні транспортні засоби по завданнях, при цьому умова об'язкого залучення усіх m з них не ставиться;

б) вибрати раціональну послідовність виконання замовлень кожним із залучених автопоїздом; виконання усіх відомих замовлень не вимагається;

в) вибрати найбільш придатний маршрут і схему організації праці та відпочинку водіїв для даного замовлення.

Кожне i-те замовлення може мати такі характеристики:

а) часові вікна $[t_{b.i}, t_{e.i}]$, де $t_{b.i}$ – момент часу, не раніше якого його потрібно розпочати у пункті його відвантаження; $t_{e.i}$ – момент часу, до якого його потрібно завершити; впродовж горизонту планування кожне замовлення може мати декілька часових вікон;

б) $t_{o.i}$ – фактичний момент початку виконання i-го замовлення;

в) $t_{f.i}$ – фактичний момент завершення у кінцевому пункті доставки;

г) t_i^k – математичне сподівання тривалості виконання замовлення за альтернативним розкладом *k, k*=1..*m*, обчислене з припущенням, що водій, який виконував його, попередньо завершив щотижневий цикл керування, і мав відповідний період відпочинку, тобто t_i^k не залежить від попередньо виконаної роботи. Оскільки $t_i^k \le T$, то впродовж горизонту планування кожен з автомобілів може виконати декілька замовлень, якщо це не суперечить конвенціям про міжнародні перевезення, наприклад, про заборону каботажних перевезень без відповідної ліцензії [204]. Щоб розпочати виконання першого з них, потрібно подати транспортний засіб в той пункт, де замовлення є сформоване не пізніше директивного моменту $t_{e.i}$. Час, необхідний водієві, для виконання замовлень потрібно узгодити з правилами ЄУТР. Вибір варіантів розкладу залежить від тривалості руху і простоювання. Отже, потрібно врахувати тривалість нульових пробігів, а також час руху і перерв у поїздці між *i, j*:

$$t_{i.j}^k = t_{i.j.mov}^k + t_{i.j.br}^k + t_{i.j.rest}^k + t_{i.j.serv}^k, \qquad (4.40)$$

де $t_{i.j.mov}^k$ – час руху вантажівки між пунктами *i* та *j* за *k* варіантом розкладу; $t_{i.j.br}^k$ – тривалість перерв для відпочинку водія; $t_{i.j.res}^k$ – тривалість щоденного відпочинку водія; $t_{i.j.serv}^k$ – тривалість інших робіт, таких як заправка автомобіля паливом, навантаження /розвантаження, митний контроль, ремонт і обслуговування автомобіля в дорозі та інші операції, які вимагають витрат робочого часу водія.

Для виконання наступного *j*-го замовлення транспортний засіб потрібно подати для завантаження в сусідній транспортний пункт, де є відповідний запит, або ж завантажити у тому ж таки пункті, де попередньо відбулося розвантаження. Замовлення *i, j* можуть бути пов'язані часовими зв'язками, у зв'язку з необхідністю дотримання допустимого розкладу. Це можна узагальнити з допомогою такої величини, яка показує співвідношення моментів початку відповідних *i*-го та *j*-го транспортного процесу (виконання замовлення) за *k* варіантом розкладу:

$$a_{i.j}^{k} = t_{o.j} - t_{o.i} + t_{i.j}^{k}, \tag{4.41}$$

або для оберненої послідовності виконання:

$$a_{j.i}^{k} = t_{o.i} - t_{o.j} + t_{j.i}^{k},\ i, j = \overline{1, P}. \tag{4.42}$$

Усю множину P відомих замовлень можна відобразити з допомогою змішаного графа $A(G,U,V)$, аналогічно, як це зроблено при вирішенні задачі, викладеної в п. 4.2. Крім того, з допомогою дуг задаються часові обмеження проекту. Так, 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, а також на відпочинок водія не витрачено часу. Очевидно:

$$a_{i.P} \le a_{i.j}. \tag{4.43}$$

Умова (4.43) виконуватиметься для будь-яких i та j. Дуга з від'ємною вагою, $-a_{i.1}$ відображає часове обмеження для виконання i-го 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 (рис. 4.26) задана, також, множина V – ребер (зв'язки без стрілок, або з обопільними стрілками), кожному $[i, j]$ з яких поставлена у відповідність пара ваг $a_{i.j}$, $a_{j.i}$.

У графі A потрібно знайти m ланцюгів, які починаються у вершині g_1, проходять через деякі вершини графа, які стосуються наявних замовлень і закінчуються у вершині g_p. Шукані ланцюги мають проходити по тих вершинах, для яких $q_{x.y} > 0$. Якщо ланцюг доходить до вершини y, а далі нема жодного шляху у графі A з невід'ємною, або ненульовою вагою, то ланцюг при цьому прямує до вершини g_p. Транспортний цикл для цього автомобіля вважатимемо завершеним, незважаючи на те, що резерв часу на виконання інших, ще не виконаних замовлень є.

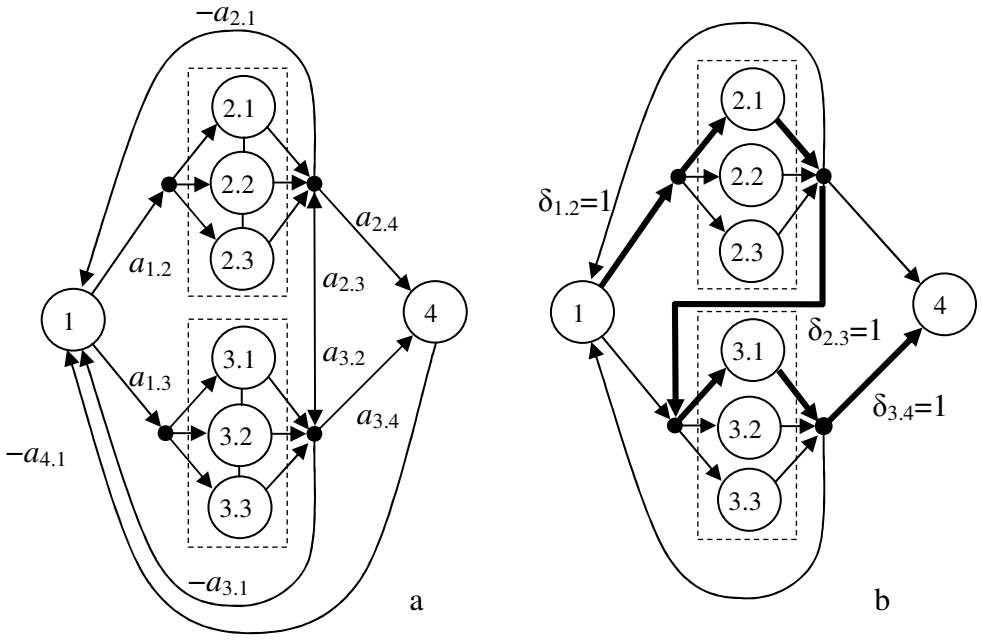


Рисунок 4.26 – Модель складання розкладу виконання замовлень на перевезення вантажів: а) змішаний граф з відміченими на ньому вагами $a_{i.j}$ відповідних дуг; б) орієнтований граф без циклів і контурів додатної ваги з відміченими змінними $\delta_{i.j}$

Задача має такі особливості з п.4.2. Період T не є наперед заданою величиною й не шукається найкоротше його числове значення. Кількість заданих АТЗ може не дорівнювати кількості реально задіяних до перевезення; крім того, щоб формалізувати дефіцит перевізних спроможностей парку транспортних засобів при заданому потоку замовлень, задаються фіктивні транспортні засоби, таким чином, з усіх знайдених формальних шляхів у графі A вибираються найкращі; інші, менш вдалі приписують фіктивним транспортним засобам. Застосовано послідовний аналіз варіантів з перебором усіх графів з множини допустимих, і пошуком серед них оптимального за критерієм (4.23). Для організації такого пошуку, з метою уникнути непродуктивного перебору неоптимальних варіантів, використано процедуру послідовного розбивання на підмножини [210]. Між вершинами графа A, які відносяться до однієї підмножини k, встановлені ребра, які означають їх незалежність. Однак фактично ці вершини відображають взамовиключні альтернативи одного і того ж замовлення, хоча й мають різні часові зв'язки. Такі відношення неможливо відобразити в графічній моделі з допомогою дуг, або ребер. Напри-

клад, на рис. 4.26 є обведені штриховою лінією вершини, які означають різні маршрути, або різні розклади. Між ними проставлено ребра, хоча має бути встановлений жорсткий взаємовиключний зв'язок. Це означає, що розклад виконання замовлень має будуватись по шляху в графі, який проходить лише через одну з трьох вершин 2.1 / 2.2 / 2.3 і, відповідно 3.1 / 3.2 / 3.3. Для реалізації цього введено додаткові змінні $\delta_{i.j.k} \in \{0,1\}$. Якщо шлях проходить у графі через вершину $g_{i.k}$, то усі інші вершини підмножини k мають бути ізольовані з використанням змінної $\delta_{i.j}$ так:

$$\sum_{j=1}^{P}\sum_{k=1}^{s}\delta_{1.j.k}=1, \tag{4.44}$$

де s – кількість альтернативних шляхів виконання j-го замовлення.

Алгоритм розв'язування задачі є таким. Множину замовлень G також розбито на k непорожніх підмножин G_k, $k=1,2,\ldots,s$, кожна з яких відображає унітарне замовлення. В задачі потрібно побудувати розклад виконання заданих замовлень на перевезення, тобто для кожної поїздки з вантажем $i \in G$ вказати момент її початку $t_{o.i}$, і момент закінчення $t_{f.i}$, а також номер автопоїзда M_{k}, на якому вона повинна виконуватись. Оптимальним вважається розклад для якого виконується умова:

$$F\left(t_{o.1},t_{o.2},\ldots,t_{o.p}\right)\to\min \tag{4.45}$$

де F – функція мети, що є, у даному випадку, загальною тривалістю проекту.

Враховуючи уведені змінні (4.44), обчислення критерію буде таким:

$$T_{pr}=\sum_{i=1}^{P}\sum_{j=1}^{P}\sum_{k=1}^{s}\delta_{i.j.k}\cdot a_{i.j.k}\to\min. \tag{4.46}$$

Зміст операцій з графом $A(G,U,V)$ полягає в наступному.

1. Ототожнити усі вершини, які входять у кожну підмножину k=1…s в одну. Вершини будь-якої множини k будуть об'єднані, а усі зв'язки їх з іншими вершинами, що не належать цій множині, будуть елімінованні, крім вершини, з якою проведено утотожнення. Наприклад, підмножина 2 графа початкової моделі, що на рис. 4.26 а, містить 3 вершини: 2.1, 2.2, 2.3. В результаті ототожнення у підмножині еліміновано вершини 2.2 і 2.3, які стають ізо-

льованими, оскільки змінні $\delta_{i.2.2}$ та $\delta_{i.2.3}$ набувають нульових значень, тобто усі зв'язки цих вершин також знищуються. Представником множини стає вершина 2.1, зв'язки якої з іншими вершинами графа залишаються.

2. Видалити контури додатної ваги графа *A*. Для цього потрібно забезпечити виконання таких обмежень:

$$\sum_{j=1}^{n} \delta_{i.j} - \sum_{i=1}^{n} \delta_{i.j} = 0, \tag{4.47}$$

що означає, що кількість дуг, які входять до будь-якої *i*-ї вершини графа *A*, крім кінцевої, повинна дорівнювати кількості дуг, які з неї виходять;

$$\sum_{j=1}^{P} \delta_{1.j.k} = M, \tag{4.48}$$

яке означає, що кількість дуг, які виходять з початкової фіктивної вершини, повинна дорівнювати кількості наявних транспортних засобів, які можуть виконувати перевезення;

$$\sum_{i=1}^{P} \delta_{i.P.k} = -M, \tag{4.49}$$

яке означає, що кількість дуг, які заходять в кінцеву фіктивну вершину, має дорівнювати кількості наявних АТЗ *M*.

Обмеження (4.47)-(4.49) разом приводять до того, що при їх виконанні у графі *A* ліквідовуються усі контури додатної ваги [170]. Операції 1 і 2 з графом проводяться одночасно, тобто виконується одночасне програмування усіх змінних $\delta_{i.j.k}$.

З іншого боку, 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 [214]. 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 [215]. За складністю алгоритму пошуку оптимального розв'язку вона відноситься поліноміальних задач, тобто для неї існує детермінований алгоритм пошуку успішного точного, або наближеного розв'язку за поліноміальний час [214]. Враховуючи те, що такі задачі можуть бути сформульовані лише для невеликої кількості замовлень на горизонті планування міжнародних перевезень, то розмір задачі і, відповідно, її складність не будуть значними. Результат застосованого впорядкування початкового графа – орієнтований граф без циклів. Окремі результати оптимізації за розробленим алгоритмом подано на рис. 4.26 б. Потовщеними стрілками показані дуги на результуючих графах, які входять до критичного шляху, тобто такі, за якими обчислюються моменти ранніх закінчень виконання замовлень $t_{o.i}$. Запропонований алгоритм було застосовано для такого прикладу. Розглядались замовлення на міжнародні перевезення вантажів у пакетах автомобільним транспортом на маршрутах:

A) Львів (Україна) - Бидгощ (Польща); B) Львів-Вроцлав (Польща), C) Брно (Чехія)-Львів; D) – Катовіце (Польща) – Львів; E) Краків (Польща)-Львів; F) Брно-Краків. Для виконання цих перевезень можуть бути використані 5 вантажних автопоїздів, які розташовані на виробничій базі під містом Львовом. Виконання кожного замовлення може бути здійснено із застосуванням різних схем організації праці і відпочинку водія, а також різних маршрутів. Показники тривалості різних варіантів цих замовлень – в таблиці 4.4. Горизонт планування – 56 годин, що відповідає одному тижню роботи. Кожним транспортним засобом керує один водій. Відпочинок і перерва водія може здійснюватись тільки у фіксованих транспортних пунктах. Тривалість простою на митному контролі в пунктах пропуску на кордоні Україна-Польща – 4 год. Тривалість навантаження/розвантаження автопоїзда для усіх замовлень є однакова – 2 години.

Таблиця 4.4 – Параметри виконання замовлень із дотриманням правил ЄУТР

Позначення	Початковий-кінцевий пункти	Часові вікна, годин	Тривалості виконання, годин	Тривалість роботи водія, годин	Тривалість керування, годин
A	L'viv-Bydgoszcz	[24; 32] [48; 56]	1) 25,2 2) 26 3) 27,1 4) 29,5	1) 13 2) 15 3) 16 4) 19	1) 8,2 2) 11 3) 7,7 4) 10,2
B	L'viv-Wroclaw	[12; 20] [29; 38]	1) 19,52 2) 20,31 3) 23,1 4) 29,2	1) 10,5 2) 12 3) 4)	1) 6,5 2) 6,5 3) 8,2 4) 8,2
C	Brno-L'viv	[32; 42]	1) 16,7 2) 21 3) 25 4) 31,4	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)
D	Katowice-L'viv	[0; 12] [25; 37] [49; 61]	1) 11 2) 14 3) 16	1) 2) 3)	1) 2) 3)
E	Krakow- L'viv	[10; 22] [32; 44]	1) 9,5 2) 12,5 3) 14	1) 2) 3)	1) 2) 3)
F	Brno-Krakow	[0; 12] [20; 32] [46; 58]	1) 10 2) 11 3) 12,5	1) 2) 3)	1) 2) 3)

Як видно з таблиці тривалість рейсу є в прямій залежності від тривалості роботи водія. Тривалості рейсів тут обчислені з припущенням, що транспортний цикл виконується на початку тижневого циклу і попередньо водій не скорочував щотижневого відпочинку.

Якщо для одного транспортного засобу призначити декілька завдань (замовлень) то тривалість виконання кожного з них відрізнятиметься від тої, що подана в табл.4.5.

Таблиця 4.5 – Параметри оптимального проекту виконання 6 замовлень

Транспортний засіб	Маршрут	Тривалість, годин				
		циклу	роботи водія	щоденного відпочинку	перерв	керування
1	L'viv- Bydgoszcz - Brno - L'viv	52,5	34,7	20	3,8	23
2	L'viv- Wroclaw- Katowice- L'viv	40	29,5	9	1,5	19
3	L'viv- Brno	50	36,8	11	2,2	27,5

Тому для моделювання процесу було складено матрицю переходів від виконання одного транспортного завдання до іншого. Час, необхідний для виконання нового замовлення складається з таких елементів:

а) час нульового пробігу до місця першого завантаження;

б) час простою, пов'язаного з щоденним відпочинком водія;

в) час простою, пов'язаний перервами у керуванні;

г) час очікування початку часових вікон.

Для того, щоб, наприклад, знайти перехідну тривалість від замовлення А1 (Львів-Бидгощ) до замовлення Е1 (Краків-Львів), визначимо залишковий робочий час водія після виконання замовлення А1 згідно з табл. 4.4. Тривалість цього циклу становить 25,2 год., у тому числі робота водія – 13 годин, розподілений відпочинок 3 + 9 =12 годин. Керування транспортним засобом – 8,2 годин. Оскільки водій не перевищив дозволену нормативну тривалість робочого часу, то у нього залишився резерв часу для того, щоб добратись в Краків для завантаження. Часове вікно в Кракові – [32, 44]. Крім того, після останнього міжзмінного відпочинку на маршруті А1, Львів-Бидгощ використано 4,5 годин робочого часу разом з 2 години розвантаження у Бидгощі. Час руху за маршрутом Бидгощ-Краків – 5,2 год. по трасі А1. Це означає, що впродовж чинної зміни водій зможе виконати поїздку до Кракова. У Кракові транспортний засіб має вибір: розпочати 11 годинний відпочинок і завантажитись, або ж простояти близько 40 хвилин до початку завантаження, завантажитись упродовж 2 годин і відправитись на міжзмінний відпочинок. У першому випадку витрачається зайвий час на простоювання, тому доцільно вибрати другий, згідно з яким тривалість перехідного процесу до завантаження становить: 5,2 + 11 = 16,2 годин. Після початку виконання циклу А1 до початку Е1 минає 41,4 години, що вкладається у друге часове вікно. Зауважимо, що перехідний час суттєво залежить від того, яку альтернативу транспортного циклу вибрано. Це можна відобразити на прикладі переходу від замовлення А до замовлення Е на рисунку 4.27.

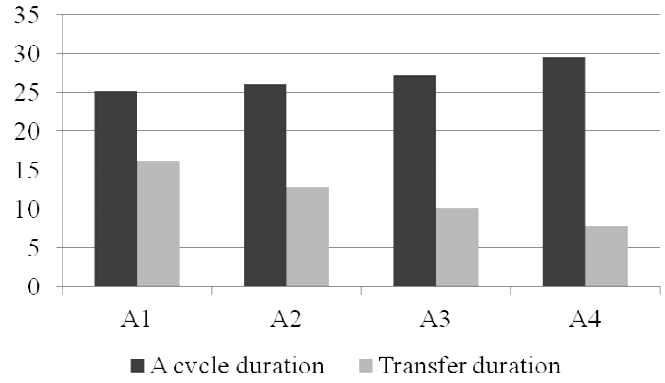


Рисунок 4.27 – Залежність тривалість циклу від тривалість доставки попереднього циклу А, годин

Така залежність прослідковується для переважної більшості перехідних процесів. З цього можна зробити висновок, що вибір меншого за тривалістю циклу транспортування супроводжується зростанням витрат на перехідні процеси. Тому задача вибору послідовності виконання замовлень є оптимізаційною. Формалізація процедури обчислення перехідної тривалості є досить складною [216].

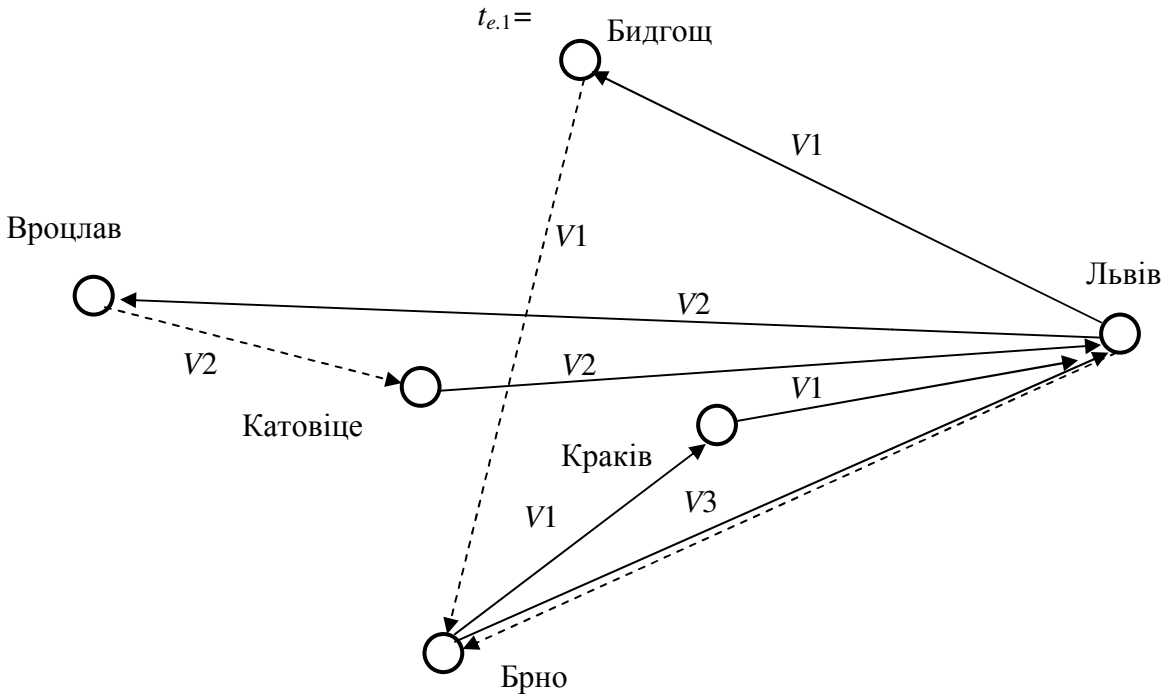


Рисунок 4.28 – Результати оптимізації міжнародних транспортних циклів: V_k – номер АТЗ

Отримана матриця перехідних тривалостей є несиметричною відносно своєї діагоналі. Розмір матриці залежить від кількості альтернативних розк-

ладів виконання замовлень. Для оптимізації спільного розкладу групи *m* автопоїздів при виконанні вказаних в табл. 4.4 замовлень використано описаний алгоритм. Результати оптимізації представлені у вигляді сукупності маршрутів (рис. 4.28). Параметри маршрутів описано в таблиці 4.6. Загальна тривалість виконання усіх замовлень дорівнює тривалості найдовшого циклу – 52,5 годин. Це є незначно менше, ніж горизонт планування (195 год.). Збільшення кількості АТЗ до 4 незначно скорочує загальну тривалість проекту – 40 годин. 5 і 6 автомобілів майже з однаковою успішністю виконують замовлення. Змінною у даному випадку була кількість автомобілів, задіяних в проекті. Усього їх було 6. На рисунку представлено варіант проекту, у якому задіяно 3 автомобілі.

4.8 Висновки за розділом 4

1. Розроблена методика оптимізації ТП та відповідний алгоритм дає змогу отримати бажані часові параметри унітарного циклічного розкладу парку транспортних засобів, випадково розподіленого на МТМ. На відміну від відомих, алгоритм послідовно наближує до локальних оптимальних значень моментів початку виконання замовлень і забезпечує дотримання часових вікон. Також алгоритм передбачає можливість моделювати початкові умови оптимізації, перш за все – зі змінним парком АТЗ, який застосовується.

2. Розв’язання сформульованої задачі оптимізації циклів перевезення унітарних замовлень дає чіткий розклад виконання їздок, розкриває комбінацію маршрутів. Так само – з використанням збірних вантажів. Крім того, є можливість вибрати найбільш раціональну ТТС, при якій за заданого періоду прогнозування АТЗ використовуються найбільш ефективно.

4. Для того, щоб побудувати розклад ТП міжміських вантажних перевезень без затримок потрібно врахувати характер виникнення і готовності до перевезення вантажів у пунктах відправлення. Загальні затримки АТЗ впродовж циклу залежать від структури маршруту, кількості АТЗ, які беруть участь в циклі, тривалості прогнозу. Запропонований алгоритм розроблення

розкладу враховує усі ці чинники і, на відміну від відомих методик, дає гарантований оптимум. Він є ближчим до практичних проблем перевізників а також є придатним для використанні в автоматизованих системах керування транспортними системами.

5. Аналіз відомих методик маршрутизації та складання розкладів транспортних засобів показав, що при зростанні кількості замовлень, особливо незапланованих, вони стають неефективними за якістю результатів. 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 здійснена за ознаками часової сумісності з врахуванням часових вікон.

6. Розв'язки задач складання розкладів мають вищий якісний рівень, якщо їх отримувати комплексно з маршрутизацією і розподілом автомобілів по відомих замовленнях. Це досягається за рахунок інтегративного ефекту і отримання більшої кількості альтернативних рішень.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [1, 4, 60, 7, 8, 14, 26, 27, 28, 29, 57, 33, 34, 49, 51, 54, 59, 66]

РОЗДІЛ 5
ОРГАНІЗАЦІЯ ТА КОНТРОЛЬ РОЗПОДІЛУ МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ У ТРАНСПОРТНИХ ВУЗЛАХ

5.1 Характеристика транспортно-технологічних схем вантажопереробки у транспортних вузлах

МТМ складається з транспортних пунктів і шляхів сполучень між ними. Вузлами мережі є транспортні пункти, де відбуваються виробничі процеси, або їх частини, і перетинаються вантажопотоки. У дискретні моменти часу τ_i у кожному *i*-му вузлі зароджуються готові до обміну об'єкти транспортування – вантажі, і/або потреба у таких об'єктах. До процесів у вузлах можна віднести також і споживання матеріальних виробів. Вузли МТМ можуть бути джерелами, стоками вантажопотоків, або транзитними. Статус їх змінюється залежно від напрямків вантажопотоку. Тому змінюються відносно початкового плану перевезень і маршрути. Об'єкти транспортування, вантажі – мають наперед відому структуру і властивості (рис. 5.1) [245].

Рисунок 5.1 – Ієрархічна структура вантажів

Виріб, сировина чи споживчий пакет не мають стандартних транспортабельних розмірів, а також не переміщаються по МТМ. Транспортний пакет, контейнер, гурт – це поштучно-тарні вантажі, тому певні етапи перевезення вони проходять за кратні такту випуску інтервали часу.

У проміжних транспортних вузлах, в дорозі між суб'єктами обміну, групи транспортних пакетів затримуються для формування гурту відправки, сортування по напрямках, або у зв'язку із зайнятістю засобів перевезення, або умов для їх подальшого переміщення. Контейнери затримуються у контейне-

рних пунктах через подібні причини за виключенням пересортування вмісту. Це є підставою умовно класифікувати транспортні вузли на контейнерні й пакетні. Розглянемо транзитний контейнерний вузол (рис. 5.2).

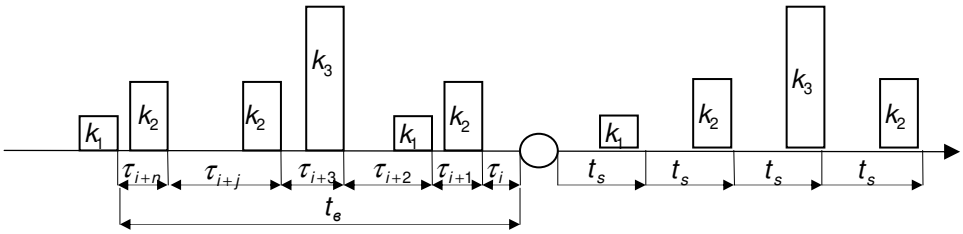


Рисунок 5.2 – Модель роботи контейнерного вузла

У вузлі відбувається обробка контейнерів, або гуртів вантажів з продуктивністю $1/t_s$, яка не залежить від розміру гурту, або ємності контейнера k, для якої повинна виконуватись нерівність $t_s \geq \tau_i$, де τ_i – такт вхідного потоку. Інакше відбуватиметься постійне нагромадження черги. На рис. 5.2 показано 3 типи контейнерів, відповідно k_1, k_2, k_3, які відповідають модульній системі, тобто $k_3 = 2k_2 = 4k_1$. На вході й на виході з вузла контейнери залишаються незмінними за вмістом. Місткість транспортного вузла – S контейнерів середнього умовного розміру k_2. Оскільки до вузла сходяться вантажопотоки з різних джерел, то й такт надходження τ_i – змінна величина. Тому на вході відбувається пульсація, яку потрібно вирівняти, або, принаймні, згладити. Оскільки згладити потік контейнерів за розміром є неможливо, то згладжують за тактом вихідного потоку. Пульсація вхідного потоку є основною причиною утворення черг та затримок, або ж навіть втрати вантажу. Через неї вузли завантажені нерівномірно, що спричинює понаднормові витрати ресурсів [246]. Проте, її вирівнювання також приводить до затримок середньої швидкості проходження одиниці вантажу через вузол. Так, беручи до уваги модель вузла, середня швидкість вантажопотоку за час $t_в$ становить:

$$V_н = \frac{k_i + k_{i+1} + \ldots + k_{i+n}}{\tau_i + \tau_{i+1} + \ldots + \tau_{i+n}}, \qquad (5.1)$$

де k_i – розмір контейнера, який надійшов після i-го такту.

Це й ж вхідний потік контейнерів на виході з вузла, при умові дотримання принципу неперервності потоку, матиме середню швидкість:

$$V_в = \frac{k_i + k_{i+1} + \ldots + k_{i+n}}{n \cdot t_s}. \quad (5.2)$$

Оскільки тривалість обробки вантажів є не меншою, ніж будь-який вхідний такт, то при вирівнюванні пульсації буде виконуватись співвідношення середніх за часом швидкостей: $V_в < V_н$.

Місткість транспортного контейнерного вузла є достатньою, для згладжування незначних пульсацій вантажопотоків. І коли пульсація досягне значного рівня, тобто для *i*+*j*-го такту виконуватиметься нерівність:

$$t_в + \frac{k_{i+j}}{V_п} > t_р + \frac{S}{V_в}, \quad (5.3)$$

де $t_р$ – ймовірний час виходу *i*+*j*-го контейнера з вузла, то контейнер не прийматимуть у вузлі, що на практиці означає одну з вірогідних подій:

- повернення у вихідний вузол;
- проходження крізь вузол, що розглядався без відповідної обробки, що спричинить втрату часу, або інших ресурсів у наступних етапах проходження крізь транспортну мережу;
- втрату вантажу та інше.

Такі ситуації є на практиці недопустимими. Однак, їх потрібно передбачати. А це означає, що у вузол відправлення з даного контейнерного вузла потрібно відправити інформацію з упередженням, не меншим, ніж $t_в$.

Ситуація для транзитного пакетного вузла дещо відрізняється (рис. 5.3). Розглянемо транспортні пакети стандартних розмірів. Гурти пакетів можна перегрупувати на відправки стандартних обсягів (для прикладу, на рис. 5.3 – по 4 пакети в гурті), а також відправляти вантажі з вузла за однаковий проміжок часу t_s. При цьому потрібна найменша затримка вантажів у вузлі, незважаючи на пріоритет їх доставки, хоча цілком її уникнути не вдається. Потрібно виконати комбіноване вирівнювання пульсацій – часом, і/або обсягом. Але при такому вирівнюванні ускладнюється маршрутизація по загальній МТМ, а на практиці навіть губиться кінцевий адресат доставки [247]. Отже, у

пакетному вузлі, порівнюючи з контейнерним, потрібно більший обсяг, іншу структуру та швидкість передачі транспортної інформації.

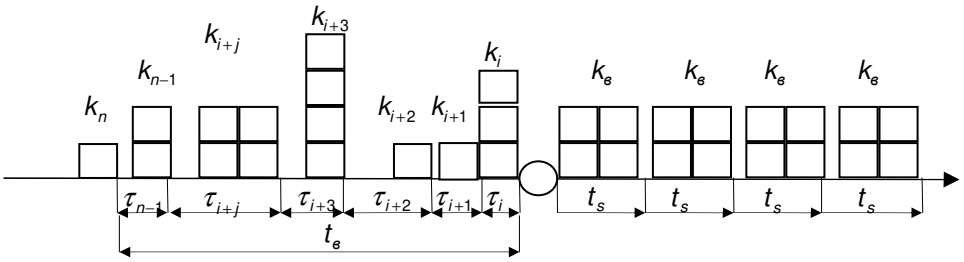


Рисунок 5.3 – Модель роботи пакетного вузла

Для того, щоб визначити необхідний зміст та напрям та швидкість інформаційних потоків, виконано аналіз сучасних пакетних і контейнерних технологій, які мають місце при міжміських і міжнародних вантажних перевезеннях. МТМ, яка складається з контейнерних і/або пакетних вузлів, роботу яких змодельовано вище. Місткість вузлів – змінна, пропускна здатність шляхів сполучення – стала, обмежена. Якщо канал доставки є зайнятим в даний момент часу, то для відправки чергового гурту вантажів у той самий момент часу вибирають альтернативний канал. Таким чином, у будь-який момент часу між будь-яким двома вузлами, які не сполучені безпосередньо каналом постачання (налагодженим автомобільним сполученням), і через які має проходити вантажопотік, може існувати декілька альтернативних маршрутів, інформація про які має бути і у відправника, і у споживача вчасно, і при необхідності. Також виявлено, що у випадку затримки транспортного пакета в будь-якому транзитному вузлі, або джерелі понад заданий час $T_в$ цей пакет можна віднести до втрачених. Вузли, як згадано вище, у різний час можуть бути відправниками, споживачами, або транзитними. Також вузли можуть виконувати функції укрупнення, подрібнення, розподілу і злиття вантажопотоків, обробляти, водночас, великогуртові та дрібногуртові потоки. Якщо функція вузла є складною, то її доцільно прокласифікувати, розділивши на рівні. Для класифікації функцій керування процесами на МТМ застосовано аналог системи керування комп'ютерною мережею (рис.5.4) [248, 249]. Структура функцій транспортного вузла – ієрархічна. За аналогією можна виділити три рівні функцій: 1)виробничий процес в поєднанні з інфра-

структурою – найвищий рівень, який характеризується тим, що випускає і приймає великогуртові вантажопотоки; 2) стрижневий процес – частина виробничого процесу, яка випускає вантажі, які є готовими виробами в даній галузі, проте не готові до масового розподілу на мережі через відсутність відповідних розподільчих засобів (транспортної тари, мережі збуту тощо); 3)частковий процес – частина виробничого процесу, яка створює і доставляє незавершений виріб.

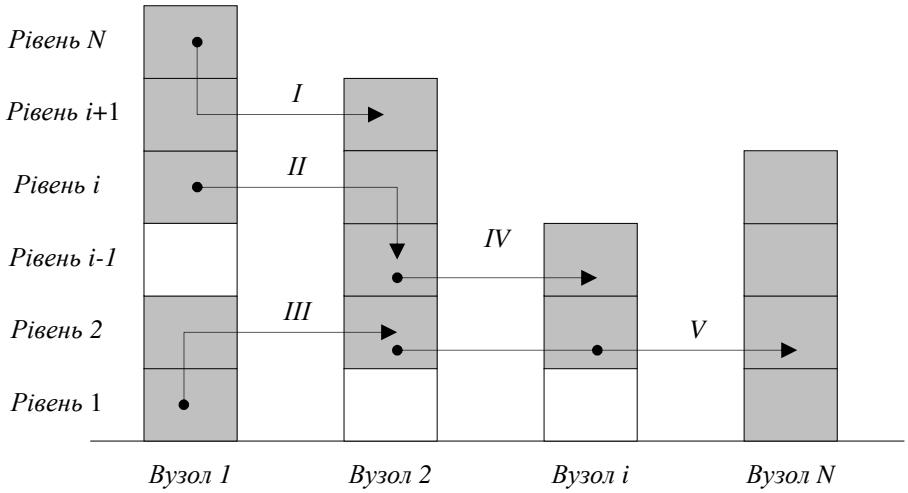


Рисунок 5.4 – Відображення принципів ієрархії транспортних вузлів та вантажопотоків на МТМ

Кількість функцій одного транспортного вузла може бути різною, а їх структура – дуже складною. Тому, створюючи систему розподілу функцій, виконаємо їх поділ на рівні [249, 250]. Для означення і розподілу функцій транспортного вузла введемо термін *об'єкт рівня* – фізичний елемент ТТС, який може виконувати функції керування матеріальними потоками в заданому обсязі. Наприклад, об'єкти, які відносяться до одного рівня – це склади, обсяг яких не перевищує заданої межі. Такі склади нагромаджують вантажі до рівня великогуртової відправки. Також такі склади виконують функції об'єктів нижчого рівня: відправка по маршрутах, комплектування, дрібногуртова відправка. Однак, об'єкти одного рівня створюються так, щоб обмін матеріалопотоками між ними був мінімальним. Кожен *n*-ний рівень функцій транспортного вузла може забезпечуватись довільною кількістю об'єктів рівня, які є незалежними, але їх сукупність визначає потужність функцій даного

рівня, яку назвемо *сервісом рівня*. Так, якщо, наприклад, розглядається функція «навантаження транспортного засобу» об’єкта рівня «навантажувальний пост», то кожен з таких об’єктів має обмежену пропускну здатність, є незалежним. Сукупність таких постів описується сервісом «розподіл автомобілепотоків». Отже, при формуванні ієрархії функцій транспортного вузла застосовано такі принципи:

1) кожен рівень функцій виконує скінченну множину завдань;

2) рівні окреслено так, щоб функції об’єктів одного рівня були незалежними.

Межі між рівнями функцій вузла проведено так, щоб потоки вантажів та обмін інформацією між ними були мінімальними.

Для прикладу розглянемо декілька виробничих процесів на географічно виділеній території, елементи яких є роззосередженими по різних транспортних вузлах МТМ. Припускалося, що ці елементи обмінюються продукцією зі сталою, характерною для них в даний період дослідження періодичністю, яка характеризується тактом потоку. Як правило, максимальний такт характерний для часткових процесів, мінімальний – для виробничого [245]. Гурт пакетів є максимальним для виробничого, мінімальним – для часткового процесу. Розглянемо усі вузли МТМ як пакетні. Вантажопотоки всередині вузла не брались до уваги. Міжвузлові потоки транспортних пакетів характеризуються одним з п'яти випадків (див. рис. 5.4 – римські цифри).

I. Вантажопотік з вищого рівня на нижчий повинен обов'язково проходити через нижчий рівень того ж вузла. Таким чином забезпечується умова відповідності розміру гурту вантажів комутованих вузлів. Так, при транспортуванні пакетів з рівня *N* вузла 1 (В1) до рівня *i*+1 вузла 2 (В2) потрібно подрібнити гурт на менші розміри, що виконується у цьому ж вузлі.

II. Вантажопотік, подібний за характером до потоку I, відрізняється тим, що у В1 немає необхідного рівня *i*-1, тому вантажі переміщаються до рівня *i*-1 В2, а там відбувається обробка потоку в межах місцевої ТС.

III. Міжвузловий потік на вищий рівень суміжного транспортного вузла В2 виконується тільки між однаковими рівнями різних вузлів, чим забезпечуєть-

ся сформульована для потоку I умова.

IV. Простий міжвузловий потік одного рівня. Відправник і споживач приймають вантажі однакового гурту.

V. Простий потік з транзитним вузлом був детально розглянутий на рис. 5.3.

Зміст задач керування транспортними процесами у вузлах МТМ – так розподіляти вантажопотоки, щоб дотримуватись мінімальних сумарних затримок транспортування пакетів при максимальній надійності їх відправки. Усі транспортні пакети мають бути «обрамлені» відповідною керуючою інформацією, структуру якої прийнято за аналогією до маршрутизації пакетів в комп'ютерних мережах [249]. Схема керування ТП, відповідно, вимагає упорядкованого інформаційного потоку. Це можна відобразити завдяки застосуванню аналогу *метода віртуальних з'єднань* [248]. Зміст цього метода полягає в тому, що транспортні вузли комутуються лише після того, як попередньо був прорахований варіант з їх комутацією і її вплив на числове значення критерію виконання ТП. Формально для цього застосовуються процедури рекурсії – вкладених циклів [248]. Необхідний інформаційний супровід транспортних пакетів здійснюється залежно від напрямку вантажопотоку, у якому вони присутні (рис. 5.5).

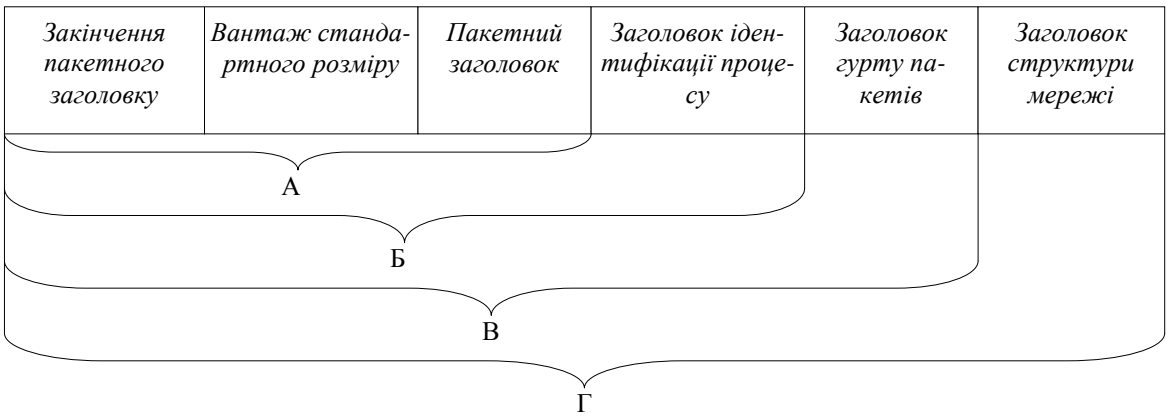


Рисунок 5.5 – Типи пакетної інформації

Невід'ємною частиною пакета, яка супроводжує його від вузла відправки до вузла призначення є повідомлення А, що складається із *заголовка пакета* та *закінчення заголовка*. Це є ідентифікаційні елементи, які становлять частину інформаційних потоків на МТМ. *Заголовок пакета* містить відомості

про: а) вузол призначення пакету; б) вузол відправки; в) час його відправки; г) час прибуття д) номер у необхідній послідовності прибуття у вузол призначення серед гурту відправлених пакетів. *Закінчення заголовка* містить контрольні відомості про: а) фактичний час відправки з початкового вузла; б) фактичний момент прибуття у кінцевий вузол; в) фактичний номер у порядку прибуття у кінцевий пункт. Заголовок ідентифікації додається до пакета при його проходженні через транзитні транспортні вузли, де порівнюється поточний час проходження МТМ, локалізація відносно пункту призначення і запланований час доставки. В результаті в заголовку ідентифікації записується пріоритет відправки пакета. За допомогою цього заголовка знижується рівень невизначеності стосовно впорядкування вантажопотоків. Повідомлення Б в одному вузлі згруповуються і їм надається додатковий заголовок В, який містить відомості про: а) розмір гурту пакетів; б) орієнтовний час їх відправки з вузла; в) орієнтовний маршрут з вказуванням кінцевого вузла, де пакет потрібно трансформувати/доставити. Зрештою, на підставі аналізу усіх наявних на МТМ повідомлень В (приймалося, що вони надходять в пункт прийняття рішення миттєво, як тільки є сформованими) приймаються рішення стосовно розкладів відправлення / прибуття, та маршрутів, обчислюється значення критерію і записується уточнений заголовок Г гурту пакетів, який схожий за структурою із заголовком В. Потрібно зауважити, що під час передачі транспортних пакетів кожен рівень (див. рис. 5.5) дописує до отриманого гурту пакетів оновлений заголовок Б-Г. Отже інформаційна система, що використовується для керування вантажопотоками у транспортних вузлах, та на МТМ, повинна бути багаторівневою, базуватись на інформації, яку містять повідомлення з матеріальних носіїв (транспортні пакети, гурти пакетів), дискретною за часом, а її такт має підпорядковуватись такту матеріального потоку в МТМ.

Оптимізація вантажопотоків на МТМ є багатоваріантною нелінійною за характером: числове значення критерію та обмеження залежить від взаємозалежних змінних. На даний час не існує методів її точного розв’язування. Натомість, пропонується декомпозиція загальної задачі на простіші, складання загального розв’язку з часткових, і оцінювання ймовірних похибок такого

підходу. Часткові задачі при цьому розв'язувались методами, які дають гарантований приблизний розв'язок з оцінкою точності. Це – задачі:

- оптимізації вантажопотоків, які проходять через заданий вузловий пункт;
- узгодження вантажопотоків і автомобілепотоків у транспортному вузловому пункті;
- організація централізованого керування потоками на МТМ.

5.2 Оптимізація автомобілепотоків для обслуговування заданого пункту відправлення вантажів

Зміст задачі – виявити такі параметри заданої частини МТМ, яка складається з пункту навантаження поштучних вантажів з паралельними постами відправлення АТЗ і декількох маршрутів доставки, за яких сумарні затримки вантажопотоків, автомобілепотоків і простоювання навантажувально-розвантажувальних машин (НРМ) є мінімальними і прямують до нуля. Впорядкування та оптимізація взаємодії автомобілепотоків та вантажопотоків у пункті навантаження і на заданих маршрутах для МТМ розглядалось так. Нехай у транспортному пункті виконується навантаження автомобілів, які працюють на обслуговуванні j постійних замовників з доставка поштучних вантажів по незалежних один від одного маршрутах, мінімальна гарантована тривалість руху по яких є відома – $t_{m.j}$. Впродовж довільно малого періоду сумарний вантажопотік розглядають стаціонарним, хоча попит кожного споживача можна оцінити середньою інтенсивністю μ_j, яка є змінною величиною [81]. Оскільки вантажі – поштучні, доставляються гуртами у транспортних пакетах, то кожну з цих величин запишемо, як:

$$\mu_j = \frac{k_j}{\tau_j}, \text{ пакетів/год.}, \tag{5.4}$$

де k_j – розмір гурту (кількість транспортних пакетів на АТЗ), які доставляються j-му споживачеві; τ_j – такт доставки вантажів, год.

Для досягнення сформульованої мети не потрібно, щоб параметр k_j наближався до значення номінальної вантажності транспортних засобів, які задіяні у МТМ, навіть якщо це негативно впливає на вартість доставки одиниці

товару. Однак, k_j має свої допустимі межі: $k_{\min} \le k_j \le k_{\max}$. Мінімальне значення завантаженості АТЗ $k_{\min}$=1, максимальне – $k_{\max}$=34, що відповідає максимальній кількості транспортних пакетів на стандартних піддонах в напівпричепі-фургоні. Номінальна вантажомісткість АТЗ – ціле число, що відповідає максимальній кількості стандартних пакетів, які можна в нього завантажити. Її вибирано з ряду $k^n_{\min} \ldots k^n_{\max}$, де $k^n_{\min}$=1. При цьому фактична вантажомісткість автомобіля k_i може бути меншою, ніж номінальна. Це дає змогу довести тривалість окремих логістичних операцій до кратної такту тривалості. Тривалість навантаження АТЗ – нормоване значення, що залежить від кількості навантажених пакетів, тобто [251]:

$$t_n = z \cdot k, \tag{5.5}$$

де z – норма часу для завантаження одного пакета, год.

Приймалося, що такт доставки τ_j також не обмежений вимогами споживачів. Головна умова до обслуговування вантажопотоків на МТМ – щоб середня інтенсивність постачання вантажів за деякий період не перевищувала інтенсивності їх споживання. А, оскільки такт доставки є значно меншим, ніж тривалість зміни, то його числове значення не впливає на якість обслуговування споживачів. З іншого боку, такт відправлення транспортних пакетів τ_i повинен бути кратним такту попередньої логістичної операції – навантаження і наступної – розвантаження, для того, щоб були відсутніми затримки ТП. В окремих випадках може бути вирішено, що коли деякому g-му споживачеві, вантаж не постачається, то $\tau_g = nu$, де nu – достатньо велике число, таке, що, згідно з (5.4) $\mu_g \to 0$. Таким чином у цій задачі приймалось, що інтенсивність кожного вантажопотоку обмежена максимальним значенням інтенсивності його споживання, пропускною здатністю поста навантаження, через який він проходить, та потужністю автомобілепотоку, який його обслуговує.

У вузловому транспортному пункті може бути $i = 1 \ldots p$ постів, кожен з яких характеризується різним значенням обсягу фактичного навантаження k_i, яке вибирається, виходячи з раціональної вантажності АТЗ, які заїжджають

саме на цей пост – з одного боку, та тривалості навантаження t_n, яка повинна бути кратною такту τ_i – з іншого. Найкраще використання автомобілів за вантажністю і за часом є тоді, коли кількість постів i відповідає ряду номінальних вантажомісткостей парку АТЗ, що обслуговує транспортний пункт [251-254]. Якщо АТЗ випускають на маршрут з тактом τ_i, то, очевидно, що без затримок такий випуск здійснюватиметься, коли:

$$\tau_i = t_{n,i} = z \cdot k_i, \tag{5.6}$$

де $k_i \approx k_i^n$ – вантажомісткість i-го АТЗ, яка наближується до свого номінального значення.

З іншого боку, $\tau_{n.i} = \tau_{m.i} = \tau_j$, або, враховуючи вирази (5.5) і (5.6): $\tau_{n,i} = k_i \cdot z = \tau_j$. Після перетворень отримаємо:

$$\mu_j = \frac{1}{z}. \tag{5.7}$$

Вираз (5.7) означає, що при прийнятій технології вантажних робіт інтенсивність вантажопотоків, які проходять через кожен незалежний пост повинна бути величиною сталою. Якщо ж деякі параметри ТТС у транспортному пункті відрізнятимуться від тих, що відповідають виразу, то виникатимуть затримки процесу доставки (рис.5.6). Як видно з моделі, на кожному етапі змін МП можуть існувати часові затримки процесу.

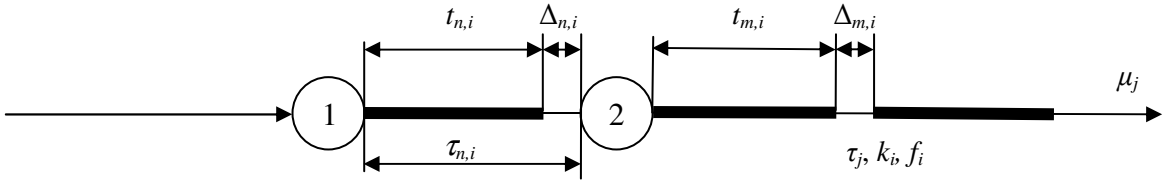


Рисунок 5.6 – Модель найпростішої ТТС у транспортному пункті з одним постом і одним маятниковим маршрутом

На етапі транспортування, оскільки тривалість цих логістичних операцій є більшою ніж їх такт, затримки визначаються за виразом:

$$\Delta_{m,i} = \tau_j - \frac{t_{m,i}}{f_i}, \text{ год.}, \tag{5.8}$$

де f_i – фронт АТЗ на i-му маршруті – кількість автомобілів, які одночасно відправлені до j-го споживача з i-го поста. Фронт визначається з виразу (2.8).

Затримка (5.8) фактично виникатиме тоді, коли черговий завантажений АТЗ не зможе бути відправленим на маршрут, оскільки ще не відправлено попереднього, або ж тоді, коли він не зможе розвантажитись через зайнятість пункту кінцевої доставки вантажу попереднім автомобілем.

На етапі навантаження, якщо f_i=1, то затримка визначиться:

$$\Delta^1_{n,i} = \tau_{n,1} - t_{n,i}\,. \tag{5.9}$$

Причиною затримки (5.9) є нерівномірність тривалості навантаження різних транспортних засобів, які з різною кількістю пакетів k_i відправляються в рейс. Приймалося, що затримки $\Delta^1_{n,i}$ є цілком відсутні, оскільки пости навантаження – спеціалізовані щодо обсягу навантаження на кожен автомобіль.

Якщо ж f_i >1 (існує, щонайменше один пост очікування навантаження), то затримка процесу виникає внаслідок нерівномірності прибуття АТЗ в пункт навантаження, їх простоювання в черзі, і визначається за виразом:

$$\Delta^2_{n,i} = \tau_{1-2} \cdot \left(f_n - 1\right). \tag{5.10}$$

Отже, критерій побудови злагодженого ТП в пункті – найменші сумарні затримки у ній, запишемо:

$$\Delta_\Sigma = \sum_i \Delta^1_{n,i} + \sum_i \Delta^2_{n,i} + \sum_j \Delta_{m,j}\,. \tag{5.11}$$

Якщо на кожен фіксований j-й маршрут відправляти лише автомобілі вантажністю k_i з одного поста без черги, то такт відправлення τ_i лише за деяких значень k_i відповідатиме такту роботи АТЗ на маршруті τ_j без затримок (рис. 5.7). Саме при цих значеннях k_i витримується відношення (5.5) і зводяться до нуля затримки (5.11). Однак, це призводить до незадоволеного попиту споживачів. Адже тут висувається додаткова вимога (5.7). Якщо інтенсивність споживання μ_j зміниться, то за мінімумом затримок процесу споживачам доставлятиметься стільки вантажів, скільки це може забезпечити раці-

онально побудована ТТС. Якщо ж зорієнтуватись на повне задоволення споживача, то від цього зростатимуть затримки вантажопотоків на маршрутах.

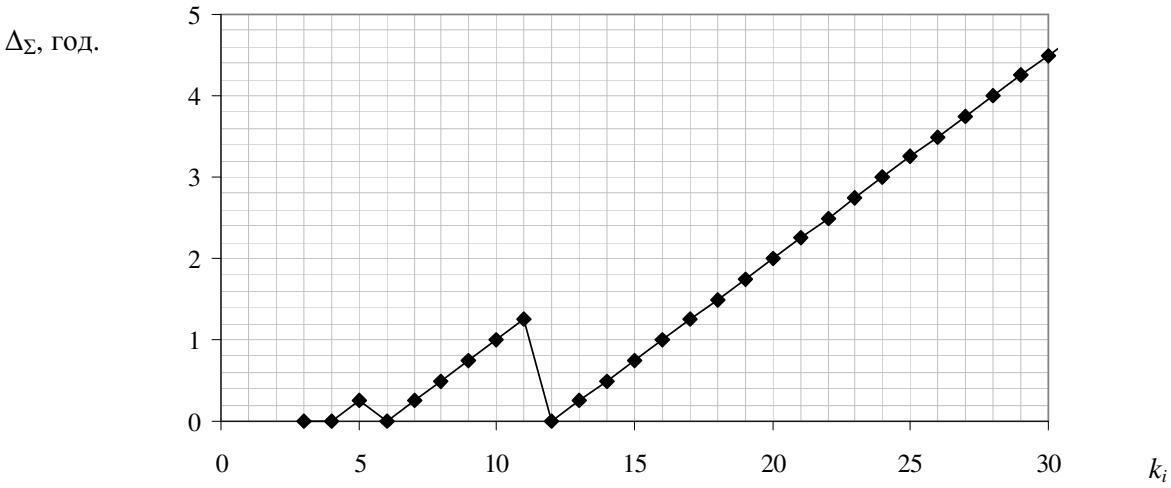


Рисунок 5.7 – Залежність сумарних затримок доставки вантажів на одному маршруті через один пост навантаження за наявності АТЗ вантажності k_i

Розв'язок такої суперечності знаходимо розділенням автомобілепотоків на декілька різних за фактичною вантажністю, використанням, відповідно, декількох паралельних постів навантаження, і комбінуванням їх, залежно від зміни споживання вантажів. Комбінування передбачає можливість злиття автомобілепотоків з різною вантажністю в одному напрямку руху з необхідною інтенсивністю. Таким чином, автомобілі на кожному маршруті є об'єднані завданням доставки, а в транспортному пункті – операціями навантаження. Тому можна говорити про синтез середньої, або великої ТС за означенням [89]. При цьому часові параметри зайнятості і простоювання автомобілів на різних маршрутах і під навантаженням є взаємозалежними. Для того, щоб показати ці зв'язки, ми застосували принцип нерозривності МП (вантажопотоків, автомобілепотоків) і відобразили систему з п'яти ЕЛО [245]. Модель обслуговування АТЗ у транспортному пункті можна відобразити графом (рис. 5.8), вершинами якого є доконані події (1, 2, 3 – прибуття однакових за фактичною вантажністю автомобілів в транспортний пункт на відповідний їх вантажності пост; 4, 5, 6 – навантаження автомобілів і відправлення їх на різні маршрути доставки вантажів; I, II, III – об'єднання автомобілепотоків, різних за вантажністю у пункті призначення вантажів і розвантаження), а дуги – матеріальні потоки автомобілів, вантажів.

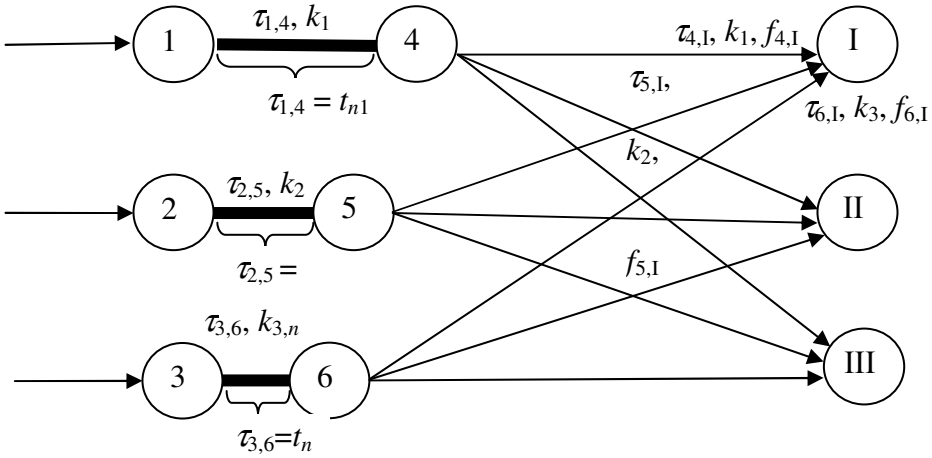


Рисунок 5.8 – ТТС навантаження гурту автомобілів на трьох постах, які працюють на трьох різних маршрутах

Оскільки процес є циклічним і неперервним, то кожну дугу його моделі можна оцінити кількісно трьома параметрами: тактом $\tau_{i,j}$, розміром гурту матеріальних елементів k_i, які переміщаються разом, фронтом $f_{i,j}$, де i – номер попередньої операції, j – номер наступної. На рис. 5.8 позначено параметри лише тих дуг, які заходять до вершини I. Усі інші – спрощено не показані. Також дуги мають іншу часову оцінку – дійсну тривалість елементарної логістичної операції, наприклад, $t_{m.1}\ldots t_{m.j}$ – тривалість руху для j-го маршруту, або ж t_n – тривалість навантаження. На рис.5.8 ці тривалості показані суцільним потовщеним відрізком. Зрозуміло, вони можуть бути випадковими величинами, однак для отримання злагодженого розкладу процесу за принципом „саме вчасно”, відповідні такти мають бути величинами сталими і дорівнювати тривалостям операцій.Наприклад, до споживача I відправляють АТЗ з трьома обсягами завантажень: k_1, k_2, k_3. Для того, щоб виконувалась умова доставки (5.7), потрібно, щоб виконувалась умова нерозривності потоку:

$$\mu_j = \sum_{i=1}^{p} \frac{k_i}{\tau_{i,j}}, \tag{5.12}$$

де i – номер вершини, з якої відправлені автомобілепотоки (пости навантаження і розділення автомобілепотоків i=1…p; j – номер вершини, у яку вантажопотоки скеровані. З іншого боку поділ автомобілепотоків за напрямками відбувається з дотриманням співвідношенням параметрів:

$$\frac{1}{\tau_{x,i,}} = \sum_{j=1}^{M} \frac{1}{\tau_{i,j}}, \tag{5.13}$$

де $\tau_{x,i}$ – такт роботи x-го поста навантаження; $\tau_{i,j}$ – такт відправлення АТЗ з i-го поста навантаження на j-й маршрут.

Описана задача відносно моделі на рис. 5.8 має таке формулювання. Задано: z – норма часу навантаження одного пакета; μ_j – середня інтенсивність споживання пакетів на трьох маршрутах; $t_{m,j}$ – тривалість циклу АТЗ від навантаження до j-го споживача, й у зворотному напрямку. Знайти цілі, невід'ємні значення фактичних вантажностей АТЗ – k_1, k_2, k_3, фронтів АТЗ – $f_{i.j}$, за яких $\Delta_\Sigma \to 0$, при виконанні умов (5.5), (5.6), а також максимуму продуктивності АТЗ, що практично можливо, коли сумарний фронт АТЗ на усіх автомобілепотоках – мінімальний: $f_\Sigma \to \min$. Такт руху АТЗ на кожному маршруті підбирався таким, щоб задовольнити вираз (5.7). Він повинен бути таким, щоб, наблизити до нуля, з одного боку, затримки часу (5.10), з іншого – затримки (5.11). Оскільки за своїм змістом вони є суперечними, то й задача носить оптимізаційний характер. Обмеження накладаються на числові значення k_i. В такому формулюванні задача відноситься до задач цілочислового випуклого програмування [196]. Для її розв'язання було застосовано метод градієнтів. Розв'язання забезпечено прикладними пакетами електронних таблиць *Excel* (додаток Г).

Проте не для усіх числових значень початкових даних було можливим знайти розв'язки. Ті з них, що були знайдені, характеризуються різною структурою парку АТЗ, який обслуговує задані маршрути. Так, наприклад, при сумарній інтенсивності μ_Σ = 12 пакетів/год., нормі часу для навантаження одного пакета z = 0,25 год., і тривалості циклів на трьох маршрутах, відповідно, $t_{m,1}$ =1 год., $t_{m,2}$=3 год., $t_{m,3}$ = 5 год. оптимальний розв'язок стосувався сумарного фронту автомобілів f =3, які завантажуються до значення, відповідно, 4, 12 і 20 пакетів. При цьому працюють усі три пости навантаження. Автомобілі відправляються на усі три маршрути з однаковою середньою інтенсивністю вантажопотоків μ_i=4 пакети/год. Відрізняється робота постів тривалістю навантаження і, відповідно, тактом. Але при цьому кожен пост обслуговує автомобілепотік на один маршрут. Тобто маємо три незалежні малі ТТС. Сумарна вантажомісткість парку АТЗ, що задіяні в цих схемах – 36 пакетів. Мар-

шрути можна оцінити сукупним коефіцієнтом нерівномірності тривалості транспортного циклу:

$$\eta_{t_ц} = \frac{t_{m,\max}}{\bar{t}_m}, \qquad (5.14)$$

де $t_{m,\max}$ – максимальна тривалість циклу, год., $\bar{t}_m$ – середня тривалість циклу, год. Коефіцієнт нерівномірності тривалості циклу для цього випадку становить 1,67.

Якщо задати іншу тривалість циклів, де коефіцієнт нерівномірності (5.14) є значно більшим, наприклад, $t_{m,1}$=1 год., $t_{m,2}$=2 год., $t_{m,3}$=9 год. ($\eta_{t_ц}$ =2,25), то оптимальний розв'язок – це парк АТЗ, що складається з автомобілів однакової вантажності – 8 пакетів. Автомобілі при цьому навантажуються на трьох постах, а на маршрути відправляються з однаковим тактом – 2 год. Автомобілепотоки з кожного поста розділяються на два потоки і скеровуються на різні маршрути з різним тактом. Коефіцієнт нерівномірності тривалості циклів – 2,25, а сумарна вантажомісткість парку АТЗ – 144 пакети. Сумарний фронт – 5 одиниць. Таким чином оптимальна ТТС при іншому співвідношенні тривалостей циклів і сталому сумарному вантажопотоку уже стає середньою за згаданою класифікацією [89]. Отже, розмір сумарного вантажопотоку не є доцільним показником класифікації. Змінюючи властивості маршрутів, а саме тривалість циклів їх обслуговування, ми отримали залежність показника сумарної вантажомісткості парку АТЗ – k_Σ, які обслуговують ТТС від коефіцієнта нерівномірності (рис. 5.9). Як видно з діаграми, ці залежності є дискретними прямо-пропорційними. Це означає, що саме структура циклів є визначальною ознакою класифікації ТТС. Для того, щоб виявити сприятливі для розв'язку задачі початкові дані, було досліджено їх вплив на оптимальний розв'язок. Так із збільшенням сумарного вантажопотоку сумарна вантажомісткість АТЗ у ТТС зростає дискретно (рис. 5.10). При цьому кожна неперервна ділянка (інтервал між двома точковими значеннями на діаграмі) відповідає одній незмінній схемі. Комбінуванням різних автомобілепотоків вдалося забезпечити майже увесь діапазон вантажопотоків.

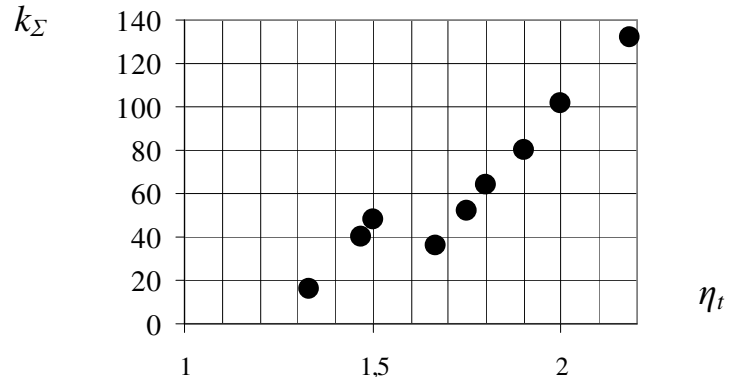


Рисунок 5.9 – Залежність сумарної вантажомісткості АТЗ, які обслуговують задану ТТС від коефіцієнта нерівномірності циклів, що входять до неї

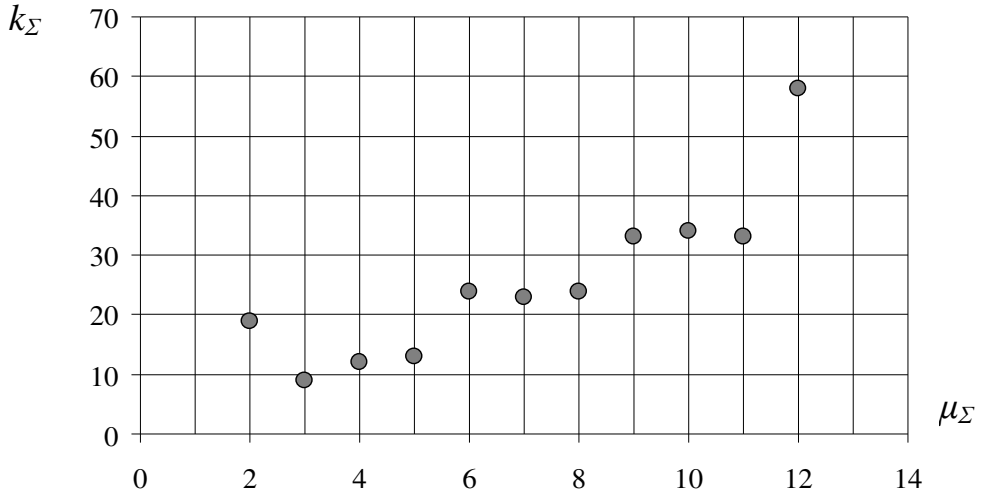


Рисунок 5.10 – Залежність сумарної вантажомісткості АТЗ від сумарного вантажопотоку

Однак структура його за трьома напрямками при зміні сумарної інтенсивності суттєво відрізняється. Так, наприклад, при заданій інтенсивності споживання μ_Σ=5 пакетів/год. розподіл її по трьох різних маршрутах з тривалостями руху по них, відповідно, t_{m1}=2 год., t_{m2} = 3 год., t_{m3}=5год., становив: μ_1=2,5, μ_2=1,0, μ_1= 1,0 пакетів/год.

Тобто дійсна сумарна інтенсивність є меншою – $\mu_{\Sigma,\partial}$ = 4,5 пакетів/год. А вже при μ_Σ = 12 пакетів/год. розподіл змінився: μ_1=0, μ_2=1,0, μ_1= 11 пакетів/год. Відхилення дійсного від запланованого обсягу перевезень немає. Однак перший, найменш тривалий маршрут не обслуговується. Це можна пояснити значною відмінністю коротких транспортних циклів, яка підсилюється, коли зростають вантажопотоки і потрібно використовувати автомобілі з більшою вантажністю. Такі дослідження показують і те, що умову максималь-

но виконати запланований обсяг перевезення при максимальній продуктивності АТЗ (мінімальній їх кількості) і без затримок часу фактично неможливо. Так, у першому випадку при $\mu_{\Sigma,\partial}$ = 4,5 пакетів/год., використовується парк АТЗ з вантажностями 1 і 3 пакети у кількості, відповідно, 10 і 1 автомобілів. У другому, при $\mu_{\Sigma,\partial}$ = 12 пакетів/год. – з вантажностями 1, 4, 5 пакетів у кількості, відповідно, 18, 4 і 4 одиниці. Сумарна вантажомісткість АТЗ у першому випадку становить 13 пакетів, у другому – 58 (див. рис. 5.7). Якщо кількість постів навантаження, а отже – типів автомобілів за вантажністю збільшити, то обсяг незадоволеного попиту на перевезення значно скорочується. Так при трьох постах максимальне відхилення заданої інтенсивності від дійсної становило 1 пакет/год. А вже при чотирьох постах – лише 0,3 пакети/год. Також було досліджено вплив норми часу навантаження одного пакета на дійсну сумарну інтенсивність вантажопотоків (рис. 5.11). Як видно з діаграми, залежність є оберенено-пропорційною. При значенні z<0,2 розв'язок оптимізаційної задачі відсутній. При z>0,55 інтенсивність вантажопотоків суттєво не змінюється. Парк АТЗ, які при цьому використовуються, характеризується мінімальною кількістю, а структура його для усього діапазону області значень $\mu_{\Sigma,\partial}$ залишається незмінною: використовуються три типи АТЗ з середніми фактичними вантажомісткостями, відповідно, 3, 6 і 18 пакетів. Таким чином, досліджений параметричний ряд ТТС з трьома постами окреслює технологічні особливості процесу доставки вантажів у пакетах: продуктивність НРМ, вантажність АТЗ. Відобразивши ТТС у вигляді моделі детермінованих залежностей організаційних параметрів логістичних операцій, які утворюють ланцюги постачання пакетів, вперше вдалося розв'язати задачу побудови гарантованого оптимального розкладу роботи задіяних АТЗ і НРМ за критерієм мінімальних сумарних затримок процесу, при умові максимальної продуктивності засобів. Виконані дослідження були обмежені розглядом одного навантажувального пункту, в якому є 1…4 пости навантаження. Використана методика детермінованих ЛЛ дає змогу змоделювати ширшу МТМ і отримати глобальніші розв'язки на ній. Завдання впорядкування взаємодії АТЗ та НРМ у вузловому транспортному пункті розглядалось також

при умові, що є декілька постів навантаження / розвантаження і що вони є розділені.

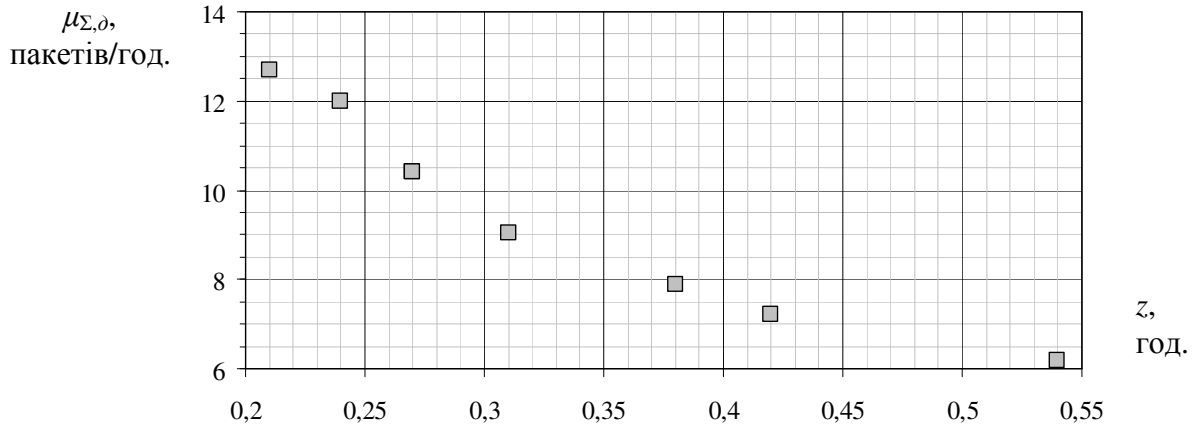


Рисунок 5.10 – Залежність дійсної сумарної середньої інтенсивності вантажопотоків від норми часу для навантаження одного пакета

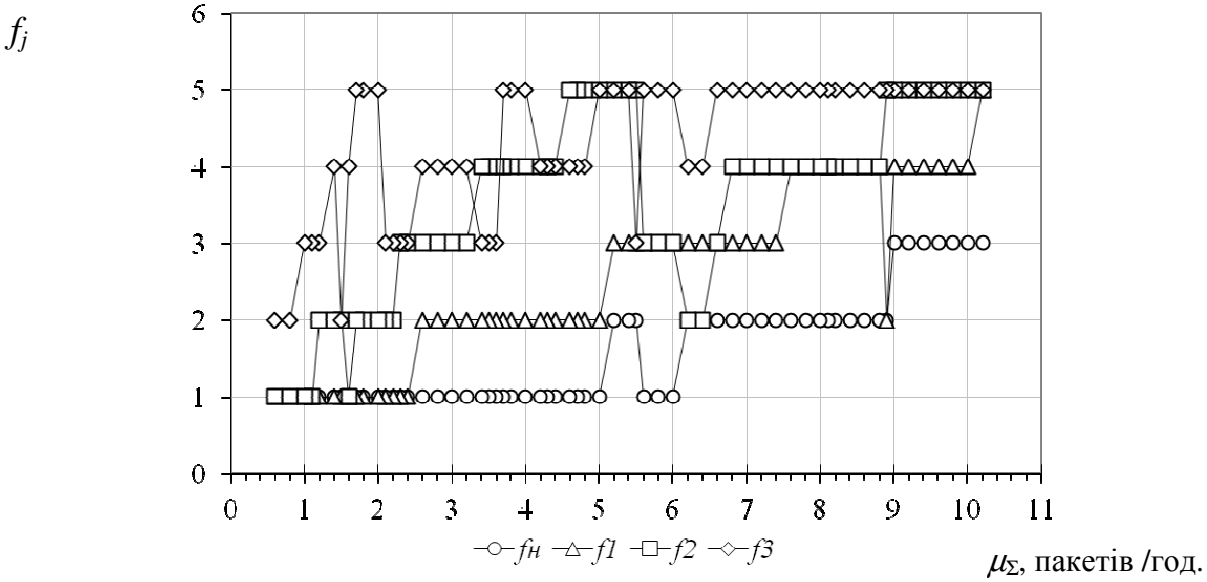


Рисунок 5.11 – Залежність фронту АТЗ на маршрутах і під навантаженням від інтенсивності вантажопотоку

При цьому фронт зайнятих на маршрутах АТЗ прямо впливає на витрати по здійсненні перевезень. Проте, як видно з рис. 5.11, він зростає нелінійно із збільшенням вантажопотоків. Для оптимальних ТТС характерно, що автомобілі використовуються найбільш інтенсивно. Із збільшенням вантажопотоків ТТС стають більш стабільними щодо фронту автомобілів, що може свідчити про їх вищу продуктивність. Проте, фронт АТЗ у транспортних циклах, які пов’язані бодай однією операцією навантаження і їх необхідна кількість –

не однакові величини. Користуючись описаною методикою оптимізації розкладів взаємодії АТЗ в транспортному пункті (терміналі), можна побудувати параметричний ряд оптимальних ТТС, які характеризуються мінімальними сумарними затримками (табл. 5.1). З таблиці можна вибрати параметри ТП, задаючись сумарним вантажопотоком μ_Σ, який вони обслуговують.

Таблиця 5.1 – Параметричні ряди оптимальних ТТС

μ_Σ	t_n	k_1	k_2	k_3	$\tau_{1\text{-}2}$	f_n	f_1	f_2	f_3	τ_{m1}	τ_{m2}	τ_{m3}	Δ_n	Δ_m	Δ_Σ
10	0,5	1	2	5	0,22	3	4	5	5	0,5	0,67	1,00	0,64	0,33	0,97
8,8	0,5	1	2	5	0,25	2	4	4	5	0,57	0,76	1,14	0,46	0,99	1,44
8	0,4	1	2	4	0,26	2	4	4	5	0,63	0,83	1,00	0,48	0,83	1,31
6,4	0,4	1	3	4	0,37	2	3	2	4	0,78	1,56	1,25	0,69	0,47	1,15
6	0,3	1	2	3	0,32	1	3	3	5	0,83	1,11	1,00	0,22	0,83	1,06
4,8	0,3	1	1	3	0,31	1	2	5	4	1,0	0,70	1,30	0,21	0,56	0,77
4	0,2	1	1	2	0,33	1	2	4	5	1,25	0,83	1,00	0,23	0,83	1,06
3,2	0,2	1	1	2	0,42	1	2	3	4	1,56	1,04	1,25	0,32	1,25	1,56
2	0,1	1	1	1	0,50	1	1	2	5	2,5	1,67	1,00	0,40	0,83	1,23

При цьому можна вибрати необхідну кількість АТЗ з раціональною номінальною вантажомісткістю. Кожна зі схем є компромісним рішенням стосовно ритмічності навантажувальних і транспортних операцій. Так, якщо фактична вантажність автомобілів має бути великою, то зростають втрати часу на маршрутах, що компенсується більш щільним графіком під навантаженням. З таблиці також видно, що наявність постів очікування в пункті навантаження не є негативним фактором при формуванні продуктивності ТС. Простій автомобіля на такому пості компенсується тим, що такт навантаження при цьому узгоджується з тактом випуску і рухом автомобілів на маршрутах. Такі ситуації характерні для великих за розміром вантажопотоків. На практиці можна застосовувати дублювання оптимальних ТТС для того, щоб обробляти ще більші вантажопотоки. На рис. 5.12 показано відкоректований графік навантаження і роботи автомобілів та одного навантажувального пристрою при обслуговуванні трьох маршрутів з сумарною інтенсивністю 4,8 пакетів/год. [187]. Сумарний фронт автомобілів на маршрутах – 11, проте автомобіль № 1 виконує два цикли на різних маршрутах. Крім того розрахунковий такт руху автомобілів не строго дотримується, що не суперечить розрахункам сумарних затримок. Оптимізація розкладу взаємодії НРМ і АТЗ у ТТС, у яких відбувається циклічне розділення, злиття МП за критерієм мінімальних сумарних затримок процесу полягає в тому, що розв’язується супе-

речність між нерівномірністю тривалості відповідних операцій, тактом навантаження і тактом відправлення і руху транспортних засобів.

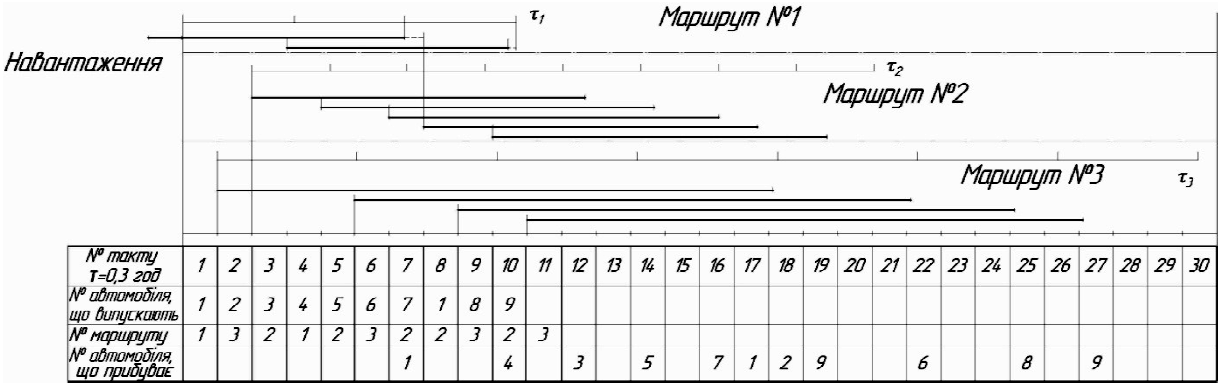


Рисунок 5.12 – Оптимальний графік навантаження і руху АТЗ при обробці сумарного вантажопотоку інтенсивністю 4,8 пакетів/год.

Вона вирішується підбором оптимального розміру гурту вантажів до відправки. Таких значень в діапазоні вантажопотоків, які обслуговує транспортний пункт може бути декілька. Тому існує параметричний ряд оптимальних розкладів цих операцій.

5.3 Узгодження вантажопотоків й автомобілепотоків у транспортному пункті магістральної транспортної мережі

Змінними даної задачі є структура вантажопотоку та автомобілепотоку, які надходять в заданий вузловий пункт МТМ. Згідно з узагальненою моделлю пакетного пункту (див. рис. 5.2), розмір і такт вхідного потоку пакетів до транспортного пункту – випадкові величини. Однак, пакети потрібно завантажити в транспортний засіб так, щоб сумарні затримки дрібногуртових відправлень пакетів були мінімальними, а навантаження на АТЗ – максимальним. Однак при цьому потрібно забезпечити вимогу допустимого навантаження АТЗ на дорожнє полотно [261]. Умова повного навантаження АТЗ потребує ретельного розгляду у зв’язку зі статичними і динамічними навантаженнями, які виникають на осях автопоїзда. Відомі методи, які базуються на тому, що при розрахунку навантаження на осі важковагового автопоїзда його розглядають як статичну систему тягач-напівпричіп. Складаючи рівняння її рівноваги відносно точок контакту рушіїв автопоїзда з дорогою [255-260]. Сформульовано таку задачу оптимізації оперативного керування заванта-

женням автопоїзда. Задано вагові і розмірні параметри автопоїзда: m_1g, m_2g, m_3g, m_cg, L_a, h, S. Також відомі стандартні розміри транспортних пакетів, які можна завантажити в одну збірну відправку автопоїзда $B_i \times W_i$, де i – номер типу транспортного пакета. Вага одного пакета q_i може бути в межах $q_{min} \ldots q_{max}$. Транспортні пакети q_i надходять до завантаження потоком з тактом τ_i. Такт прибуття автомобілів під навантаження – τ_j. Фронт автомобілів, готових до завантаження – f_j. Потрібно розробити такі схеми і послідовність завантаження АТЗ, які прибувають до транспортного пункту, які б уможливили максимальне використання їх дозволеної повної маси G_a та вантажності Q_n при дотриманні вагових обмежень для дорожніх транспортних засобів, які діють в Україні, або за кордоном. Задача розв'язувалась за три етапи. На першому етапі розглядалась індивідуальна схема навантаження для автопоїзда з конкретними заданими розмірними і ваговими параметрами [255, 261]. Критерієм розв'язку задачі є максимальна маса вантажу Q. Змінні: x – розташування приведеного центра мас вантажів в напівпричепі відносно осі сідлово-зчіпного пристрою; G_a – повна маса автопоїзда, $G_c < G_a < [G_a]$. Змінна x входить у вирази для визначення навантаження на осі автомобілів, на які накладають обмеження:

$$P_i \le [P_i], \tag{5.9}$$

де i – номер осі; величини у правій частині нерівностей – це обмеження навантажень на відповідноу вісь тягача і напівпричепа [256].

Змінна G_a визначає критерій:

$$G_c + Q = G_a. \tag{5.10}$$

Для розв'язування використано градієнтний метод розв'язування нелінійних рівнянь математичного програмування (додатки Д.Г5, Д.Г6) [196]. Отримане розрахункове значення координати центру мас дає гарантоване дотримання обмежень на осьові навантаження та максимальне завантаження автомобіля. На рис. 5.13 показано, що координата x є досить вагомим чинником, який визначає навантаження автопоїзда. Відхилення його від оптимального значення (на рис. 4,93 м) на 1 м в будь-який бік приводить до недовантаження ΔQ понад 4 т вантажу.

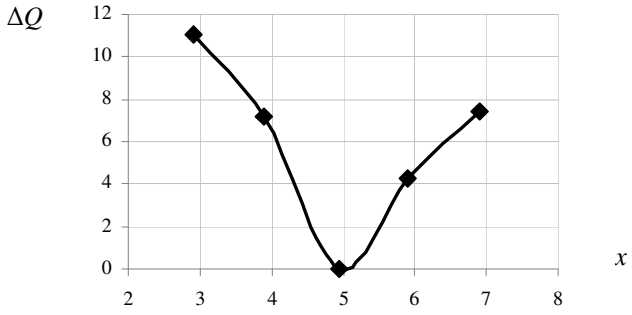


Рисунок 5.13 – Залежність недовантаження АТЗ від розташування центра мас

Другий етап розв'язку задачі полягав у тому, щоб знайти оптимальний розподіл маси вантажів по усьому простору напівпричепа. Для цього вантаж розглядався як сукупність елементарних паралелепіпедів, які мають однакові розміри ($b \times w$) і вагу q_i. Задача впорядкування паралелепіпедів у замкненому просторі є відомою і про її розв'язування йлося вище. Тому максимальна кількість транспортних пакетів у напівпричепі є величиною наперед відомою, незалежно від розмірів пакетів:

$$K_{\max} = \frac{B_a}{b} \times \frac{L_p}{w} \times H_t, \tag{5.11}$$

де B_a – внутрішня ширина напівпричепа; L_p – внутрішня довжина напівпричепа; H_t – допустима висота штабелювання пакетів (1, 2, 3 …).

Для розподілу загальної маси вантажу Q на часткові q_i застосовано принцип знаходження центра мас [262]:

$$x = \frac{\sum x_i q_i}{Q}. \tag{5.14}$$

В задачу введено додаткові цілочисельні, невід'ємні змінні ν_i, такі, що $0 \le \nu_i \le H_t$. Іншими словами, змінні ν_i приймають значення цілого числа, яке означає кількість пакетів, які можуть бути розміщені в i-у ряді простору напівпричепа від його переднього аж до заднього борта. Критерій оптимізації даного етапу загальної задачі – це мінімальне відхилення обчисленої маси вантажів Q на першому етапі задачі від тієї, що визначається сумою змінних:

$$\frac{Q}{q_i} - \sum_i \nu_i \to \min.$$

Обмеження: $$\sum_{i=1}^{K_{\max}} q_i x_i \nu_i = Q \cdot x. \qquad (5.15)$$

Також можуть накладатись додаткові обмеження, які стосуються допустимої висоти штабелювання транспортних пакетів [263, 264]. Задача у такому вигляді набуває вигляду цілочислового програмування (додатки Д.Г7, Д.Г8). Якщо прийняти, що пакети – це є елементарні куби, то розв'язок задачі дає уяву про ідеальний розподіл маси вантажу вздовж і впоперек платформи напівпричепа (рис.5.14). Тут *x'* – відстань від переднього борта напівпричепа до центра мас елементарного пакета. На рис. 5.15 показано аналогічну залежність, але умов, коли центр ваги усього вантажу розташований на відстані 7,6 м від осі сідельно-зчіпного пристрою. Якщо в результаті моделювання $\nu_i=0$, то це вантажне місце повинно бути порожнім, якщо $\nu_i=1$, то вантаж розміщають в один ряд по ширині платформи, симетрично борті. Якщо $\nu_i=2$, то кількість рядів по ширині платформи є два, у висоту – один. Якщо $\nu_i=3$, або більше, то передбачається штабелювання пакетів [265, 266]. Однак генеральні вантажі є поштучними у пакетах, які мають фіксовані стандартні розміри. Тому потрібно здійснити дискретизацію залежностей розподілу маси, як це показано на рис. 5.15. Це вносить додаткове відхилення в оптимальну схему завантаження, яке, зрештою, можна компенсувати вагою транспортних пакетів [267]. На рис. 5.16 показано оптимальну схему завантаження напівпричепа Shmitz транспортними пакетами на піддонах розміром 800×1200 мм. Максимальна кількість пакетів, які можуть поміститись в напівпричепі в один штабель є 34.

Завдяки змінним ваговим параметрам транспортного пакета досягнуто мінімального відхилення вантажності від номінальної. Це означає, що в реальних умовах транспортного процесу потрібно диференційовано підходити до формування транспортних пакетів.

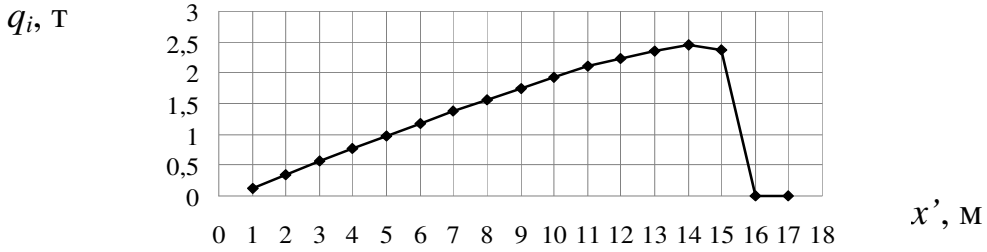


Рисунок 5.14 – Розподіл маси вантажу вздовж платформи напівпричепа при умові оптимального завантаження і розподілу навантаження на осі АТЗ при x=4,93 м

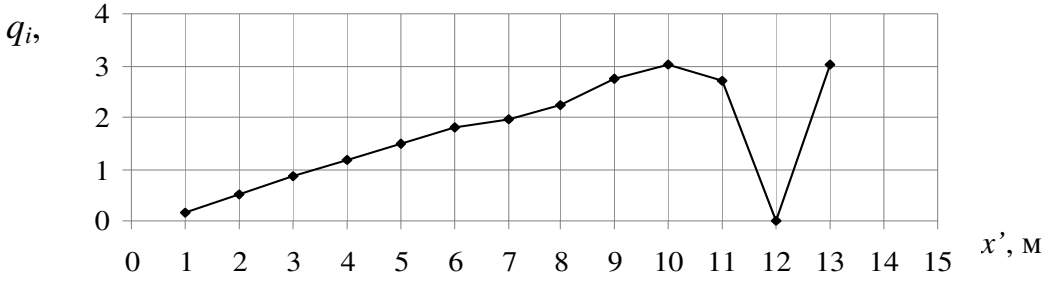


Рисунок 5.15 – Розподіл маси вантажу вздовж платформи напівпричепа при умові оптимального завантаження і розподілу навантаження на осі АТЗ x=7,6 м

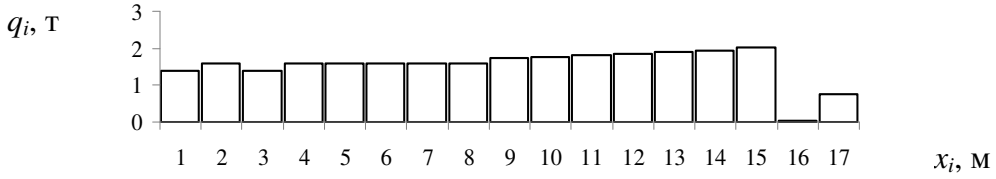


Рисунок 5.16 – Оптимальна схема розміщення транспортних пакетів 800×1200 мм в напівпричепі

Третій етап вибору схеми завантаження здійснюють за методикою, викладеною в п. 2.3. При цьому розглядаються вхідні вантажопотоки в транспортний пункт, наприклад вантажний термінал. Потрібно було оцінити параметри вхідних потоків, такі як такт, фронт і розмір гурту вантажів. Моделюючи роботу пункту як розподільчого вузла, у якому вхідні вантажопотоки спочатку зливаються, а потім розподіляються за розміром транспортних пакетів q_i, можна забезпечити будь-яку схему завантаження потрібними за вагою і розмірами пакетами. Так для схеми, що на рис. 5.15, потрібні пакети на піддонах 800×1200 мм, які не можна штабелювати у два яруси з вагами, від-

повідно: 0,4 0,7 0,9; 1,0 т, або в іншій комбінації. Пакети вкладатимуть так (табл.5.2).

Таблиця 5.2

Схема розподілу різних за вагою транспортних пакетів

№ ряду	1	2	3	4	5	6	7	8
вага пакета	0,7	0,4	0,7	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
кількість пакетів	2	4	2	4	4	4	4	4
№ ряду	9	10	11	12	13	14	15	16	17
вага пакета	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	0	0,4
кількість пакетів	2	2	2	2	2	2	2	0	2

5.4 Закономірності централізованого розподілу потоків в МТМ

Інтеграція виробничих і транспортних процесів призвела до утворення і успішного функціонування логістичних центрів (ЛЦ). На даний час ЛЦ визнано як складну ТС [203]. Через це у ньому має місце синергетичний ефект, який потребує докладнішого вивчення. В деяких публікаціях вказано на недоступність застосувати для дослідження ЛЦ параметричних моделей [167, 268-313]. Такий висновок може бути результатом використання декомпозиції при аналізі складних ТТС, що мають місце в ЛЦ. Оскільки ЛЦ – це вузловий пункт множини ЛЛ, то логічним є застосування таких моделей для його відображення. Дехто з дослідників обмежується аналізом тих систем, які вже практично склалися через вплив фінансових потоків та інших суб'єктивних чинників [155, 269-317, 318]. Для того, щоб змоделювати декілька ЛЛ, які інтегровані в ЛЦ, або в терміналі, використана методика дискретно-подійного моделювання, що відображає матеріальні та інформаційні потоки [187]. Потік, з точки зору методики – передача даних із заданим кроком моделювання Δt – додатнім дійсним числом, в напрямку від блоку вхідного потоку до інших блоків. Є можливість змінювати крок моделювання так, щоб відобразити детальні зміни ЛЛ в режимі модельного часу. Попередньо розроблено головну процедуру – систему керування потоками, яка складається з блоків керування потоками (БКП) трьох видів: 1) сповільнення / пришвидшення потоку (С/П); 2) розгалуження / сполучення потоку (Р/С);

3)позиціонування потоків (П). Блоки 1-го і 2-го типів мають два підвиди, які є виконують протилежні функції. Загалом імітаційна модель (ІМ) являє собою дерево, коренем якого є БВП, а розгалуження складають блоки С/П, Р/С, П. У дереві є ще такі блоки, які називаються кінцевими, бо до них входять, але не виходять потоки. Кінцевим може бути кожен з блоків С/П, Р/С, П. Це дерево може міняти свою структуру залежно від параметрів потоків між блоками, які, в свою чергу, залежать від параметрів БВП та від параметрів БО і БУ. У дереві можна знайти скінчену кількість ланцюгів від БВП до кінцевих блоків. Таким чином, алгоритм може бути пристосовий для ІМ будь-якої ТТС, у тому числі – з декількома ЛЦ. Потоки перетворюються всередині кожного з блоків і залишаються без змін поза межами блоків. Кожен потік, незалежно від того, де він протікає характеризується такими параметрами: 1) такт τ – дійсна додатна величина; 2) розмір гурту матеріальних елементів в потоці k – ціле додатне число; 3) витрати коштів на виконання логістичної операції – дійсне число. Характер перетворення цих параметрів залежить від виду блоку і це представлено в роботі [118]. БКП характеризуються двома параметрами, які не передаються від блоку до блоку – це фронт f – ціле додатне число, та внутрішня тривалість перетворення потоку всередині блоку – $t_в$. Внутрішню тривалість блоку обчислюють як лінійну функцію від розміру гурту k_j із відомими коефіцієнтами, а фронт – за виразом (2.8). Проте, фронт залежить від характеру перетворень операцій всередині блоку. Так, якщо $\tau_i \neq \tau_j$, і $k_i \neq k_j$, то $f=\{0,1\}$ де i , j – тут і далі, індекси параметрів, відповідно, вхідного і вихідного потоків. При оптимізації ТТС ЛЦ використано критерій логістичних витрат [187]. Логістичні витрати обчислювались так. Спершу виокремлено лише ті витрати, які залежать від параметрів МП у ТТС: а) транспортні – $C_{тр}$; б) навантаження-розвантаження – $C_{нр}$; в) складські – $C_{скл.}$; г) пакування – $C_{пак.}$; д) $C_{втр.}$ – вартість втраченої внаслідок перевищення термінів доставки продукції; е) $C_{інф.}$ – інформаційні витрати, пов'язані з обробленням замовлень, помилковою адресацією вантажів, страхуванням ризиків, дефіциту (коливання) продукції на складі, що залежать від процесу реалізації

продукції, і визначаються інформаційними потоками [155]. Для того, щоб пов'язати логістичні витрати з МП й обчислити у моделі, їх було розподілено між категоріями, а категорії – за елементами, що залежать від параметрів блоків імітаційної моделі (табл. 5.3). Зроблено це на основі обґрунтованих класифікацій логістичних витрат [118, 120].

Таблиця 5.3 – Класифікація логістичних витрат в імітаційній моделі логістичного центру

Позначення і категорія логістичних витрат	Індекс та назва складових частин категорії, що залежать від
А, транспортні	1) тривалості руху
	2) фактичного вантажообігу
	3) часу використання транспортних засобів
Б, навантажувально-розвантажувальні	1) кількості оброблених пакетів
	2) тривалості циклу
В, пакування, Г, складування	1) розміру упаковки
	2) тривалості циклу зберігання
Д, втрати продукції	1) тривалості транспортування
	2) тривалості зберігання
Е, інформаційні витрати	1) об'єму переданої інформації
	2) швидкості передачі даних

ІМ побудовано на основі чинного ЛЦ у Львівській області, підприємства, яке займається постачанням продуктів харчування. Спрощена схема – на рис. 5.17.

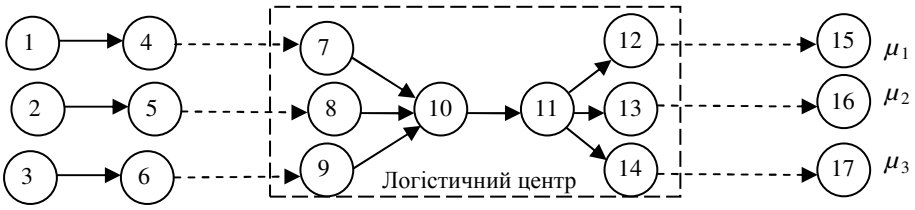


Рисунок 5.17 – Спрощена ТТС ЛЦ: 1-3 – виробництво продукції; 4-6 – відправлення укрупнених гуртів вантажів зі складів виробників; 7-9 – приймання продукції на вантажні термінали ЛЦ; 10 – складування продукції в ЛЦ; 11 – розподіл гуртів вантажів за напрямками; 12-14 – навантаження вантажів на автомобілі; 15-17 – розвантаження продукції у споживачів

Зміст процесів, які відображені на схемі, є таким. Декілька виробництв (на рис.5.18 їх показано тільки три) відправляють свою продукцію періодич-

но у міжміському сполученні зі складу малими гуртами на термінали ЛЦ. Кількість вантажних терміналів у цій моделі не було обмеженням, тобто вона співпадала з кількістю ЛЛ. На складі ЛЦ гурти вантажів нагромаджуються і відправляються за напрямками до відповідних кінцевих споживачів 15-17, де розвантажуються. Обмеження накладаються на параметри останніх в ЛЛ операцій: споживання продукції кожного споживача характеризується середньою інтенсивністю μ_i, яка визначається зі співвідношення (2.1).

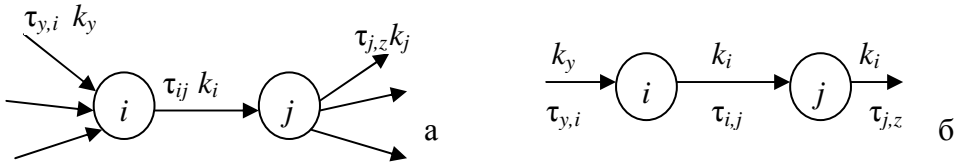


Рисунок 5.18 – Схеми елементарних процесів, які відбуваються в ЛЦ: а) об'єднання та розподіл МП за напрямками; б) нагромадження вантажів по кожному напрямку зокрема: $\tau_{y,i}$ – такт вхідного потоку; k_y – розмір гурту вантажів вхідного потоку; τ_{ij} – такт процесу; k_j – розмір гурту вихідного потоку; $\tau_{j,z}$ – такт вихідного потоку

Завдання: 1) встановити, при яких умовах ЛЛ збуту доцільно провести через ЛЦ; 2) при якій структурі і організаційних параметрах ЛЦ дає максимальний ефект? Виходячи зі схеми моделі, формальний зміст усіх МП можна звести до двох варіантів (рис.5.19). Якщо підприємство постачає вантажі через ЛЦ, то воно очікує на певні економічні виграші, які можуть бути такими, залежно які елементарні процеси мають місце в загальній транспортно-технологічній схемі. При кожному з двох варіантів (див. рис. 5.19) можливі виграші і програші:

- варіант (а) – виграші: $А_2$, $Б_2$, $В_1$, $Г_1$; програші: $А_1$, $Б_1$, $Г_2$, $Д_1$;

- варіант (б) – виграші: $А_1$, $А_3$, $Б_2$, $В_2$, $Г_2$, $Д_2$; програші: $А_1$, $Б_1$.

Якщо ЛЦ містить елементарні процеси двох типів, то це приводить до компенсації втрат виграшами, яка залежить від оптимального співвідношення і структури цих процесів. Оптимальні варіанти було знайдено з допомогою методики нелінійного програмування (див. додаток Б) [171]. Знайдено залежності максимальної гарантованої тривалості доставки та сукупних логістичних витрат від потужності ЛЦ (рис. 5.19, 5.20).

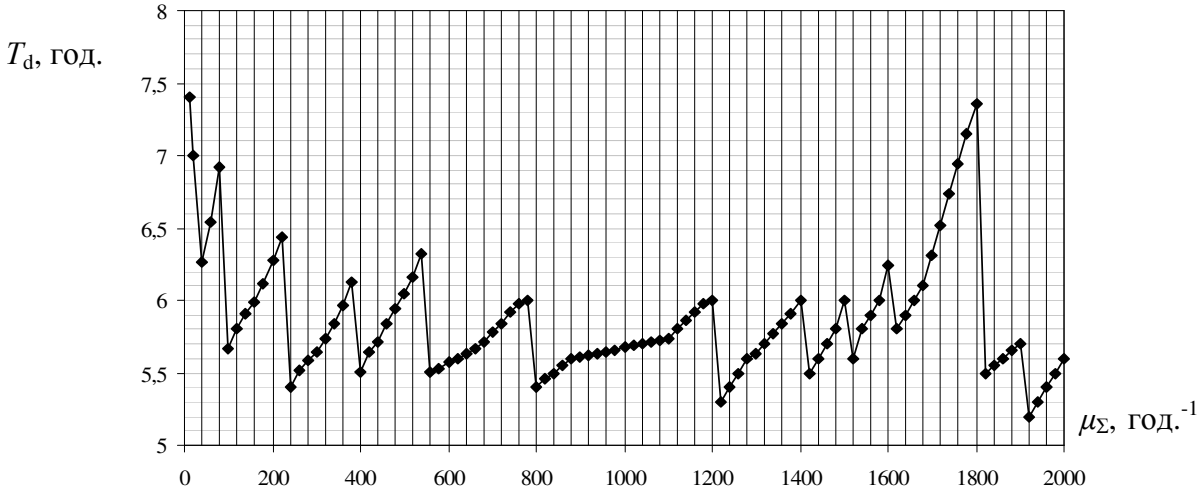


Рисунок 5.19 – Залежність гарантованої тривалості доставки продукції через ЛЦ від сумарного попиту на неї на МТМ

Залежності є кусково-неперервні. На кожній неперервній ділянці діє одна ТТС, що характеризується кількісними параметрами. З рисунків очевидно, можна виділити параметричний ряд оптимальних за логістичними витратами ТТС при дотриманні термінів їх доставки. Існує скінченна кількість оптимальних ТТС [187].

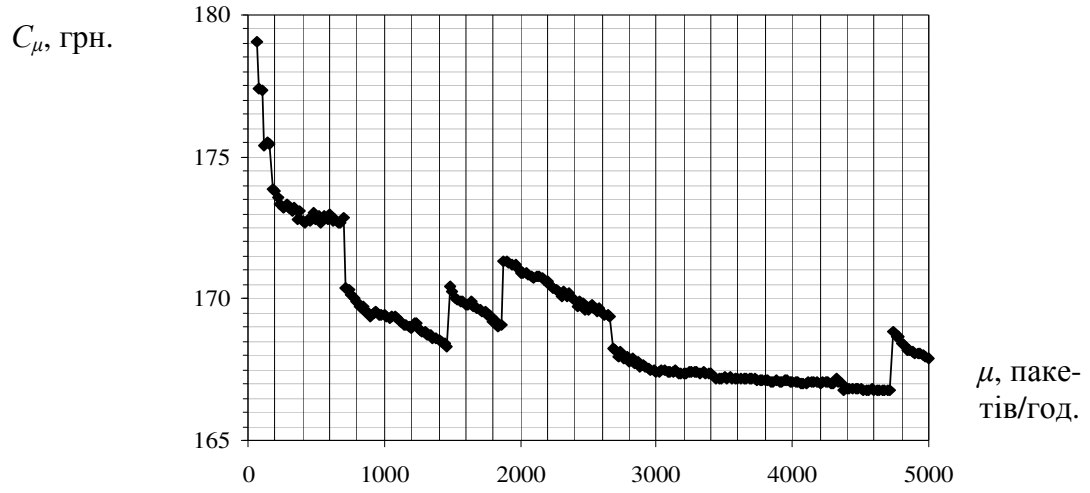


Рисунок 5.20 – Залежність сукупних логістичних витрат від середньої інтенсивності матеріальних потоків ЛЦ

5.5 Висновки за розділом 5

1. Чим більше відрізняються параметрами маршрути, які розпочинаються в заданому транспортному пункті МТМ і обслуговуються парком АТЗ,

тим більшою буде фактична вантажомісткість при сталій сумарній інтенсивності вантажопотоків. Якщо деякий маршрут має значно меншу тривалість циклу, ніж інші, то його не доцільно включати в єдину ТТС на МТМ. Для покращення якості і повноти доставляння вантажів споживачам і зниження непродуктивних затримок цього процесу доцільно при збільшенні інтенсивності вантажопотоків підвищувати продуктивність НРМ з обернено пропорційною залежністю.

2. Критерій сумарних затримок вантажопотоків у вузлових транспортних пунктах – суперечний. Підвищення інтенсивності використання АТЗ на маршрутах приводить до збільшення простоїв їх під навантаженням-розвантаженням. Задача побудови розкладу АТЗ має оптимізаційний нелінійний характер. Не усі оптимальні за складом автомобілепотоки можуть забезпечити заданий попит на перевезення, що оцінюють середньою інтенсивністю.

3. Інтенсивність розподілених в транспортному пункті потоків залежить від необхідних параметрів вихідного вантажопотоку разом із завантаженими автомобілями. Забезпечити оптимальну схему завантаження автопоїзда можна з використанням різних за вагою транспортних пакетів. Фізичний ефект від завантаження автопоїзда за оптимальною схемою може досягати до 50% номінальної вантажності АТЗ.

4. Використання послуг ЛЦ є вигідним за критерієм логістичних витрат лише при оптимальному співвідношенні процесів нагромадження і перерозподілу матеріальних потоків при заданому рівні концентрації логістичних операцій.

РОЗДІЛ 6
ОРГАНІЗАЦІЯ РУХУ АВТОПОЇЗДІВ НА МАГІСТРАЛЬНИХ ДОРОГАХ ЗА ЗАДАНОЮ ПРОГРАМОЮ

6.1 Модель системи керування рухом автопоїздів у магістральному потоці

При виконанні міжміських перевезень вантажів АТЗ повинен рухатись з такою середньою швидкістю по заданому маршруту, яка б уможливила виконання запланованого розкладу. Це означає прибуття в пункт призначення в межах часового вікна, яке сформовано замовником, та з врахуванням часу відправлення. Таку середню швидкість назвемо *бажаною швидкістю* за розкладом вантажних перевезень V_{des}. Розглянемо автомобільну магістраль між деякими перерізами l_1 та l_2. Якщо для кожного i-го АТЗ, що рухається між цими перерізами, відома *бажана програма руху*, тобто залежність бажаної середньої швидкості від переміщення x, – $V_{des.i}(x)$, то прийняті критерії ефективності організації транспортних магістральних потоків є функціями:

- сумарні затримки n АТЗ:

$$\sum_{i=1}^{n}\left(\int_{l_1}^{l_2}\left|V_{\max i}(x)-V_{des.i}(x)\right|dx\right)\to\min, \qquad (6.1)$$

- міра рівномірності руху n АТЗ

$$\sum_{i=1}^{n}\int_{l_1}^{l_2}\left|j_i(x)\right|dx\to\min, \qquad (6.2)$$

де n залежить від вибраної ділянки магістралі $[l_1;l_2]$; $V_{\max i}(x)$ – вимушена під впливом транспортного потоку середня швидкість i-го АТЗ ; $j_i(x)$ – прискорення / сповільнення i-го АТЗ при виконанні маневрів.

Для забезпечення дотримання бажаних програм руху сукупності АТЗ їх бортові системи контролю мають бути забезпечені необхідним оптимальним об’ємом вхідних даних. Потік даних про дорожні й транспортні умови на магістралях є громіздкими. Існуючі телеметричні засоби можуть забезпечити

лише короткотермінове прогнозування [319, 322-325]. Точність і обсяг даних можуть бути збільшено завдяки комунікаціям V2V (автомобіль-автомобіль), V2I (автомобіль-інфраструктура) на автомагістралі. Тому пропонується модель системи керування режимами руху сукупності АТЗ, які взаємодіють між собою, та елементами інфраструктури. Запропонована модель доповнена методикою аналізу і обробки вхідного потоку даних. Модель системи керування рухом досліджувалась на основі імітаційного моделювання.

Відомі такі системи керування магістральними перевезеннями, об'єктами яких є стаціонарні дорожні засоби, тобто зовнішні по відношенню до сукупності АТЗ [102]. Усіх їх можна розділити на три групи.

Перша група систем керування стосується змінного в часі призначення пріоритетних смуг руху, відкриття резервних, або заборон міняти смугу. У технологіях, що стосуються цих систем, використовують сенсори швидкості руху, або камери відеоспостереження, але, так чи інакше, ознаками для керування є швидкість АТЗ. Недоліками їх є те, що нема чіткого обґрунтування місця розташування сенсорів та актуаторів, отже система є неадекватною реальним транспортним умовам.

Друга група об'єднує способи і засоби керування вхідними, чи вихідними транспортними потоками на заданій ділянці автомагістралі. Це є технології, які здійснюють обмеженням доступу на магістраль, переключення потоку на альтернативний напрям тощо [326]. Нажаль, поки що ці заходи не дають практичних результатів, оскільки керуються суб'єктивними ознаками надання пріоритетів та керування.

Третя група систем відноситься до «зовнішнього» керування потоком АТЗ, і стосується обмеження швидкості руху автомобілів на дорозі. Так, якщо по різних смугах в одному напрямку рухаються автомобілі з різними швидкостями, то це викликає необхідність маневрів, які спричинюють затори і затримки. Якщо обмежити швидкість «швидких» автомобілів, прирівнюючи їх до швидкості «повільних», то потік стає однорідним за швидкістю і не викликає об'єктивних причин для виконання обгонів та змін смуги руху [333].

Однак, досі невідомо, чи такий спосіб керування не підвищує сумарні затримки за рахунок зниження бажаних швидкостей «швидких» АТЗ. Цей недолік притаманний усім трьом названим групам систем. Крім цього – вони не усувають три відомі причини виникнення затримок і заторів: а)нерівномірність швидкостей автомобілів у потоці; б) виконання маневрів (часто з причини (а)); в)прискорення та гальмування окремих автомобілів в потоці [332].

З метою усунути суб'єктивні чинники в безпеці дорожнього руху розробляють системи «внутрішнього» автоматичного керування транспортним засобом. Адже людина, як найбільш інерційна ланка в системі «водій-автомобіль-дорога-середовище» повинна, бути звільненою від потреби виконувати миттєві дії [333, 227]. Проте, цілком позитивно вплинути на транспортні умови на магістралях такі системи не можуть. А якщо на автомобільних магістралях утворюються затори, то вони зовсім втрачають свою ефективність. Крім цього, поки що системи «внутрішнього» керування є надто дорогими. Систему управління рухом, наприклад, встановлюють досі лише на автомобілях представницького класу.

Якщо використовувати стратегію тільки «зовнішнього» керування, то виконуватиметься критерій (6.2), тобто потік стане рівномірнішим за швидкостями окремих АТЗ [325]. Проте бажані програми руху певної частини автомобілів не дотримуються. Таким чином, критерій (6.1) не реалізовується. Якщо функцію керування потоком покласти лише на «внутрішні» автомобільні бортові системи, які не взаємодіють, то спостерігатиметься протилежна ситуація: автомобілі будуть ближчими кожен до своєї бажаної програми, намагаючись досягнути критерію (6.1). Однак, якщо ці програми істотно різняться, то в потоці не уникнути маневрів прискорення, зміни смуги руху, сповільнення, гальмування. В результаті критерій (6.2) ігнорується, на магістралі і надалі створюватимуться аварійні ситуації, буде мати місце перевитрата енергоресурсів та інші негативні наслідки. Очевидно, що така суперечність може бути розв'язана, якщо сформулювати об'єктивні умови і обґрунтувати напрямки реалізації комплексної системи.

Перед розробленням моделі було прийнято припущення, що у транспортному потоці автомобілі рухаються лише за об'єктивно обґрунтованою програмою руху. Якщо інші суб'єктивні причини відкинути, то виникнення прискорень / сповільнень можна виявити, розглянувши взаємодію двох АТЗ: того, для якого встановлено систему автоматизованого керування режимом руху – A_1 та того, який йому передує – A_2 і має таку ж систему (рис. 6.1).

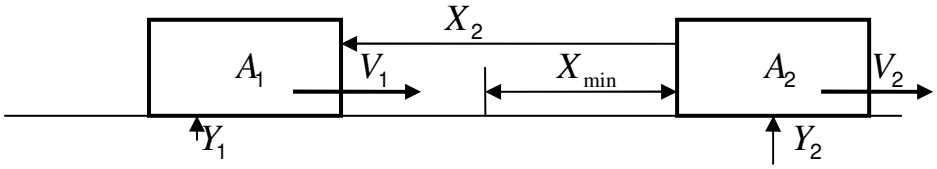


Рисунок 6.1 – Схема взаємодії транспортних засобів A_1 і A_2 на магістралі: Y_1, Y_2 – вектори первинних сигналів, що надходять, відповідно, до A_1 та A_2; X_1 – вектор вторинних сигналів, що надходять від A_2 до A_1; $Y_{\min}$ – обмеження на безпечну дистанцію руху

Між цими автомобілями може бути встановлений головний параметр взаємодії – дистанція X, мінімальне значення $X_{\min}$ якого вибрано з умов безпеки руху, та можливості виконання обгону. У деяких дослідженнях доведено суперечний традиційним поглядам факт, згідно з яким дистанція $X_{\min}$ не є функцією абсолютної швидкості автомобіля [228]. Отже $X_{\min}$ на автостраді залежить тільки від часу реакції на сповільнення попереднього автомобіля без врахування ймовірного екстренного гальмування.

Прискорений рух АТЗ A_1 виникає на магістральних дорогах у двох варіантах. Перший варіант можна описати такими нерівностями:

$$X > X_{\min},\ V_1 < V_{des.1} \approx V_2, \tag{6.3}$$

де X – поточна дистанція між A_1 та A_2; V_1 – поточна швидкість A_1; $V_{des.1}$ – бажана швидкість A_1; V_2 – швидкість автомобіля лідера A_2.

Співвідношення (6.3) відповідають ситуації, коли автомобіль A_1 наздоганяє A_2 і доводить свою поточну швидкість до бажаної, але резерв часу є обмеженим для такого маневру по дистанції $\Delta X = X - X_{\min}$. Незважаючи на простоту й типовість такої ситуації, вона є досить складною, якщо намагати-

ся її спрогнозувати. Адже, крім того, що необхідно знати випадкові функції $V_1(x)$, $V_2(x)$ для невідомих дорожніх умов, необхідно перевірити, чи вибрано адекватне значення прискорення:

$$j_1 = \frac{\int_0^{X-X_{\min}} \left(V_{des.1} - V_1(x)\right) dx}{\Delta t}, \tag{6.4}$$

яке є можливим по безпечному гальмівному шляху.

У виразі (6.4) часовий інтервал Δt є також випадковою величиною.

Другий варіант прискорення описується співвідношеннями:

$$X \approx X_{\min},\ V_1 \le V_{des.1} > V_2, \tag{6.5}$$

що відповідає ситуації, коли для автомобіля A_1 визріла потреба і є можливість для обгону.

При цьому V_1 має досягнути деякої величини швидкості обгону $V_1^{обг.}$, яка гарантує безпечність маневру. Знову ж таки, і тут потрібно перевірити, чи можна досягнути швидкості $V_1^{обг.}$ з умов динамічних властивостей автомобіля та зчеплення шин з дорогою, стан поверхні якої на заданому інтервалі є невідомим.

Сповільнення автомобіля є необхідним елементом програми руху і деякі дослідники стверджують, що чим більша його інтенсивність, тим енергетично більш ощадним є режим руху АТЗ [295, 334, 335]. Однак, це діє в сенсі уже виконаної програми руху. При необхідності перейти на нижчу швидкість, коли кінця руху не досягнуто, інтенсивне гальмування – це перевитрата енергії в гальмівній і ходовій системах АТЗ. Тому тут йдеться про мінімальне сповільнення, як небажаний, але необхідний елемент руху. Воно також можливе за двох варіантів. Перший варіант сповільнення описується співвідношеннями:

$$X \ge X_{\min},\ X_1 \ge X_{des.1} < X_2. \tag{6.6}$$

Якщо бажана швидкість досягнута, нема змісту і/або можливості рухатися з більшою швидкістю V_1, то, вочевидь, буде застосоване гальмування, і по можливості – за рахунок сил зовнішнього опору руху (рух накатом).

Другий варіант гальмування – вимушений:

$$X \approx X_{\min}, \; V_1 \geq V_{des.1} < V_2 . \tag{6.7}$$

Тут досягнуто обмеження по інтервалу руху і нема можливості для обгону.

Таким чином, після аналізу чотирьох випадків прискорення/ сповільнення, було розроблено модель системи керування транспортним потоком залежно від таких функцій:

- збурення – дистанції між автомобілями – $X(t)$;
- задаючої – бажаної програми руху $V_{des.i}(t)$;
- відхилення – оцінки власної швидкості $V_i(t)$;
- функції мети – прискорення, або сповільнення автомобіля $j_1(t)$ набуває вигляду:

$$j_i(t) = F\left(X, V_{des.i}, V_i, t\right), \; i = 1 \ldots s, \tag{6.8}$$

де F – нечітка, адаптивна функція [0].

Передбачалось, що система повинна розробити прогноз власного прискорення/сповільнення $j_i(t)$, водночас мінімізуючи його за виразом (6.2), а також дотримуватись наперед передбаченої програми руху, адаптуючи її до реальних транспортних умов, що склались. Безпосередньо отримати функції $V_i(t)$, $Y(t)$ у жодній моделі транспортного потоку з достатньою мірою точності не видається можливим. Натомість можна скористатись доступними для вимірювання сигналами, з допомогою яких – перейти до шуканих.

Більшість первинних сигналів у транспортному потоці також мають велику похибку вимірювання і передачі, тому повідомлення, які вони несуть – бувають суперечними, що вносить невизначеність у процес автоматизованого керування. Це стосується, наприклад, майже усіх способів вимірювання шви-

дкості та інтервалів між рухомими об'єктами [337, 339]. Брак інформації для вироблення рішення можуть компенсувати такі повідомлення, які, не зважаючи на чималу похибку кожного з них зокрема, в сукупності створюють більшу ентропію [340]. У зв'язку з цим, дослідження проводились у *три стадії*. Перша – аналіз відомих альтернативних функціональних моделей системи керування руху автомобілів в транспортному потоці та вибір доцільної. Друга – вибір множини параметрів і синтез алгоритму керування на основі імітаційного моделювання. Третя – аналіз потоку вхідних данихоцінювання ймовірної похибки автоматичного керування та коригування початкових моделей при умові дотримання бажаної програми руху.

На першій стадії проаналізовано три принципових варіанти систем. Варіант перший (рис. 6.2) – бортова автоматизована система (БАСК), об'єктом керування якої є окремий автомобіль *A*, до якого надходять зовнішні сигнали: вектор відстаней до рухомих та нерухомих перешкод руху – $X(t)$, та власні координати і їх зміна в часі (GPS навігатор); щодо частоти обертання кожного колеса $W(t)$ та щодо розподілу навантаження на кожну вісь $R_z(t)$ [331].

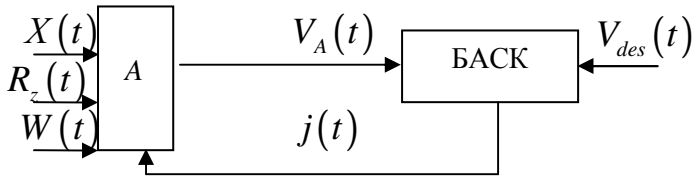


Рисунок 6.2 – Схема бортової автоматизованої системи керування одиночним автомобілем у транспортному потоці: $X(t)$ – зовнішній сигнал від перешкод (суміжних автомобілів); $R_z(t)$ – дискретний потік сигналів тензометричної системи щодо розподілу навантаження на осі; $W(t)$ – потік сигналів від колісних сенсорів частоти обертання

На основі цих вхідних сигналів виробляються оцінки:

а) коефіцієнта зчеплення шин з дорогою φ – відповідно до частот обертання ведених та ведучих коліс $w_1 - w_2$;

б) сумарного коефіцієнта дорожнього опору ψ;

в) з використанням (а) і (б) – оцінки поточного значення та прогнозу власної швидкості $V(t)$. Це є модель сучасного круїз-контролю. БАСК має задану програму руху $V_{des}(t)$ з можливістю додатково налагоджувати її, якщо сумарні затримки сягнули межі некерованості. На основі функцій $V(t)$ і $V_{des}(t)$ приймається рішення про вибір наступного режиму руху (сповільнення / прискорення / рівномірний). Схема алгоритму функціонування бортової автоматизованої системи керування за першим варіантом наведена на рис.6.3.

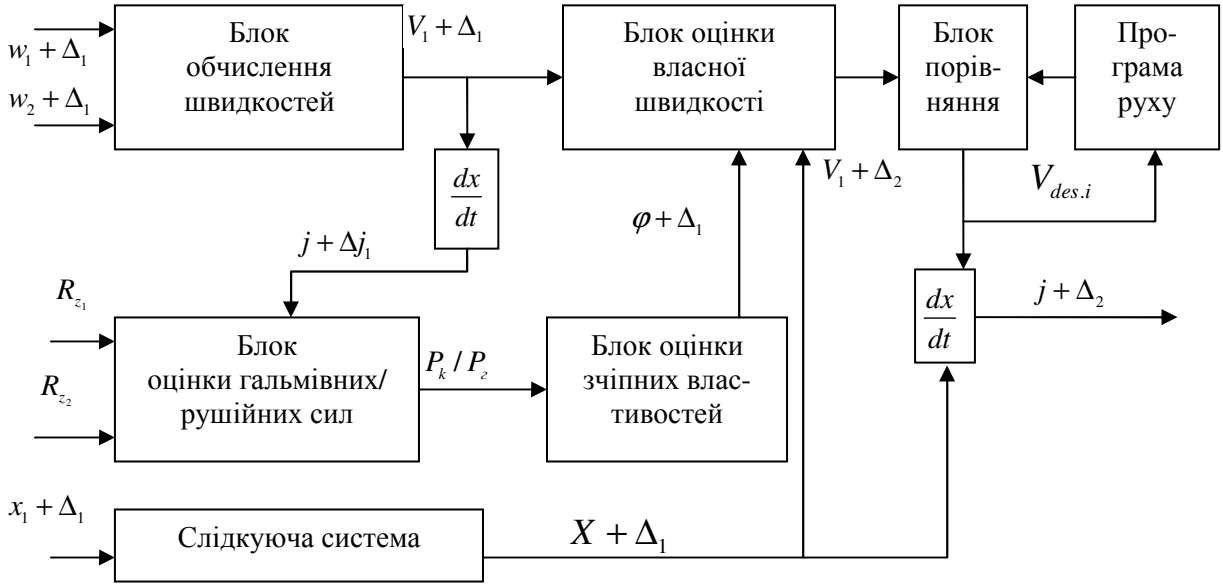


Рисунок 6.3 – Принципова схема БАСК: w_1, w_2– частота обертання ведучих, ведених коліс; ΔV_1 – первинна похибка оцінки параметра; Δ_2 – вторинна похибка оцінки параметра

Потрібно відмітити, що така система має досить значні первинні похибки вимірювання і оцінювання параметрів Δ_1. Такі похибки викликані недосконалістю способів вимірювання і невизначеностями функціональних моделей – систем рівнянь динаміки розгону (6.7) та сповільнення (6.8) автомобіля на горизонтальній дорозі з удосконаленим покриттям [334].

$$\begin{cases} m_a j + R_{z1} f_1 + R_{z2} f_2 = 0 \\ m_a \cdot j \cdot h - m_a g \cdot b + R_{z2} l + P_k d_2 = 0, \\ m_a \cdot j \cdot h + m_a g \cdot a + R_{z1} l + P_k d_2 = 0 \end{cases} \quad (6.7)$$

$$\begin{cases} m_a j + R_{z1} f_1 + R_{z2} f_2 - P_{г1} - P_{г2} = 0 \\ m_a \cdot j \cdot h - m_a g \cdot b + R_{z2} l - P_{г1} d_1 - P_{г2} d_2 = 0, \\ m_a \cdot j \cdot h + m_a g \cdot a + R_{z1} l - P_{г1} d_1 - P_{г2} d_2 = 0 \end{cases} \quad (6.8)$$

де m_a – повна маса автомобіля; R_{z1}, R_{z2} – реакції, відповідно, передніх та задніх коліс; f_1, f_2 – коефіцієнти опору кочення передніх та задніх коліс; h, a, b – координати центра мас, відповідно, висота, відстань до задньої, відстань до передньої осі; l – база автомобіля; d_2 – динамічний діаметр ведучого колеса; P – дотична сила на цьому колесі.

Як бачимо, з рівняння (6.7) у найбільш загальному випадку, залишаються невідомими такі параметри як P_k, f_1, f_2, d_2. Серед невідомих тут: $P_г, f_1, f_2, d_1$, d_2, а також гальмівні сили (не важливо, чи гальмування відбувається основною, чи допоміжною гальмівною системою) $P_{г1}$, $P_{г2}$. Систематичні похибки d_1, d_2 тут спричинені такими припущеннями: 1) $f_1 = f_2$, що лише при однаковій еластичності та стані коліс є допустимим; 2) $\phi_1 = \phi_2$, що не перевищує похибки у 5% лише при швидкості АТЗ до 50 км/год.; 3) $d_1 = d_{1статичн.}$, що досягає 15-17% при магістральних швидкостях; 4) $X_1(t)$ – неперервний сигнал, на який впливає відносна швидкість двох автомобілів. У зв'язку із похибками Δ_1 вибраний режим не завжди відповідатиме реальним коефіцієнтам ψ і φ. БАСК такого роду приводить до істотних змін первинної бажаної програми руху окремого автомобіля. Чим більша інтенсивність транспортного потоку, тим більше змін зазнає бажана програма руху.

Об'єктами керування системи другого виду є група автомобілів, до кожного з яких синхронно надходить та ж інформація, що й для БАСК (див. рис. 6.2). Це – об'єднана автоматична система керування (ОАСК) (рис. 6.4). Але, крім того, вони ще й обмінюються інформацією про відповідність вибраних режимів дорожнім умовам та щільності транспортного потоку. Група створюється на основі доступності й стійкості телеметричних сигналів. Кількість автомобілів s, які увійшли в цю групу, залежить від технічної досконалості системи передачі сигналів та від щільності транспортного потоку.

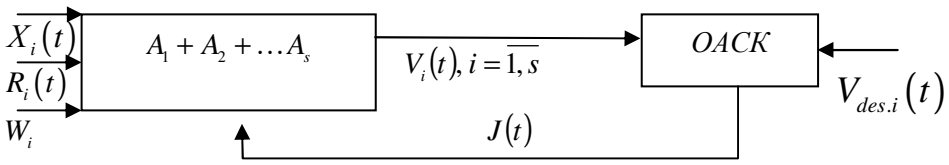


Рисунок 6.4 – Схема об'єднаної автоматизованої системи керування групою автомобілів в транспортному потоці

В зв'язку з цим ступінь невизначеності при прийнятті рішення кожним A_i залежить від тісноти зв'язків між ними. Важливим недоліком ОАСК є те, що набута групою $A_1 \ldots A_s$ інформація втрачається, а наступна група змушена отримувати її знову. Прототип такої системи був створений в проекті SATRE фірмою Volvo [341]. У звіті з проведених досліджень за проектом SATRE підтверджуються такі ж висновки.

Концепцію нової системи керування запропоновано на основі двох попередніх з тією різницею, що об'єктами її є, крім групи автомобілів, які обмінюються повідомленнями, ще й нерухомі об'єкти – лаги магістральної дороги, що сприймають, запам'ятовують та передають інформацію черговій групі автомобілів, які до них наближаються (рис. 6.5). Вона функціонує як комплексна автоматична система керування (КАСК). Група автомобілів $A_1 + A_2 + \ldots + A_i$, отримавши вектор вхідних сигналів від власних бортових систем, опрацювавши їх, та вибравши за допомогою $КАСК_1$ адекватні режими руху, передає отриману інформацію найближчому стаціонарному дорожньому об'єкту – лагу *Д*. Таких лагів вздовж магістралі є стільки, скільки потрібно для забезпечення стійкості інформаційного зв'язку мобільних об'єктів.

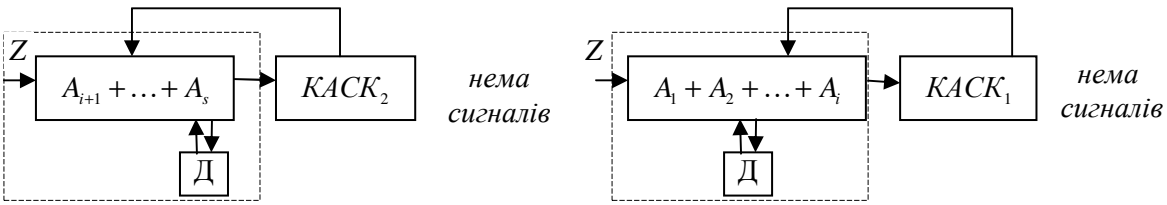


Рисунок 6.5 – Схема комплексної динамічної автоматизованої системи керування: Д – нерухомий дорожній об'єкт – лаг

Лаг Д, водночас, передає у $КАСК_1$ ту інформацію, яка набута ним від попередньої групи автомобілів і визначає миттєву швидкість АТЗ. На магіст-

ралі, очевидно, можуть виникати такі ситуації, коли дистанція між АТЗ є дуже великий, тому сигналами вони не обмінюються. Коли група автомобілів $A_{i+1} + \ldots + A_s$ після такої часової прогалини порівняється з лагом Д, то може обмінятися з ним інформацією. Таким чином, нерухомі дорожні об'єкти почергово стають елементами КАСК$_i$, а розриву інформаційних потоків немає. Це означає, що в міру нагромадження такої інформації система стає досконалішою. Якість керування КАСК напряму залежить від щільності транспортного потоку.

6.2 Імітаційне моделювання руху автотранспортних засобів на магістральних дорогах

Для вибору параметрів керування режимом руху АТЗ на магістральній міжміській дорозі було виконано ряд експериментів на імітаційній моделі. Імітаційна модель є модифікованим клітковим автоматом з двохнаправленим рухом АТЗ. Від класичних відомих моделей ми перейняли основні принципи її застосування [342,344-346]:

1) локальність правил: на новий стан клітини можуть вплинути тільки елементи її оточення і, можливо, вона сама;

2) однорідність системи: жодна область решітки не може відрізнятися від іншої через які-небудь особливості правил; введено також крайові умови на початковий кінцевий та стани моделі;

3) скінченність множини можливих станів клітки – це умова, яка необхідна, щоб для отримання нового стану клітки, виконати кінцеве число операцій;

4) одночасний перехід в новий стан для всіх клітин – допустимі значення у всіх клітинах змінюються одноразово, в кінці ітерації, а не по мірі обчислення [289].

Крім традиційних, застосовано й нові припущення й правила моделювання, які спрощують можливість досягнення мети дослідження. У нашому варіанті клітковий автомат є двовимірною сіткою, висота якої відповідає кількості смуг руху на магістралі (у тому числі – зустрічних), а довжина – це «інформаційне поле» автомобіля-спостерігача (АС), тобто скінченна стала кількість клітинок позаду АС і скінченна стала кількість клітинок попереду

АС. Таке поле обумовлене застосуванням приладів для оцінювання дорожньо-транспортної ситуації. На практиці його можна реалізувати використанням радарів, лідарів, інфрачервоних сенсорів, та інших засобів, якими може бути оснащений АС [282]. За допомогою таких приладів можна оцінити наявність і відносні координати інших учасників дорожнього руху, які рухаються як попутньо з АС, так і по зустрічних смугах. При цьому застосована двохвимірна система координат, в якій АС є початком відліку. Кожна клітинка автомата може бути зайнятою об'єктом транспортного потоку, або вільною, за виключенням початкової, яка є зайнятою завжди. Швидкість руху АС має максимально відповідати його бажаній програмі руху $V_{0.des}(x)$, де $0 \le x \le L$ – абсолютна координата клітинки відліку; L – довжина двовимірної сітки. Однак, вона може бути вимушено змінена під впливом маневрів, які виконують інші учасники потоку. Кількість непорожніх клітинок автомату залежить від наперед заданої щільності транспортного потоку, а також від розміру «інформаційного поля»: кількості клітинок позаду – R_b і кількості клітинок попереду – R_f від АС.

АТЗ відображені в автоматі залежно від їх динамічних габаритів у вигляді певної кількості заповнених клітинок. Якщо довжину однієї клітинки автомата вибрати 10 м, а час одної ітерації – 0,1 с, то переміщення об'єкта на одну клітинку відповідає зміні швидкості відносно АС на 1 м/с. Довжина переміщення, яке має бути відображене ІМ, є у декілька десятків разів більшою, ніж довжина інформаційного поля R_b+R_f. Основний інтерес цих досліджень представляє визначення відносних швидкостей і відносних переміщень. У зв'язку з цим, без суттєвого зниження точності, усі АТЗ, які є беруть участь в транспортному потоці, тут розглядаються як одноклітькові, двохклітькові, або максимально – трикліткові об'єкти, що відповідає динамічним габаритам АТЗ, відповідно, 10, 20 та 30 м. На магістральних міжміських дорогах ці габарити вимірюються реально в інтервалі від 7,5 до 27±2 м. Наше припущення не знижує адекватності моделі у зв'язку з масштабами моделювання. Сучасні системи спостереження, наприклад, на основі лідарів здатні «бачити» транспортну ситуацію на відстані близько 300-400 м. Як свідчать дослідження, це є не межею їх можливостей, і слід очікувати більшої дистанції [221]. Крім того ці засоби стають більш доступними і вже монтуються на ІТС 4-го покоління. Таким чином, якщо за розмір однієї клітинки автомата взяти величину 10 м, то сам автомат може складатись з, приблизно, 30 клітинок

вперед і стільки ж – позаду АС. Якщо учасниками потоку є автомобілі з меншим статичним габаритом, то вони володіють, як правило вищою динамікою. Отже їх динамічний габарит можна прирівняти, без суттєвої втрати точності, до розміру однієї-трьох клітинок автомата в масштабі. Похибка такого припущення є тим меншою, чим більша довжина траси, яка моделюється. Так при пробігу в 20000 м розмір клітинки становить 0,05%. Це означає, що АТЗ, який здійснює такий пробіг, буде відображений автоматом за 2000 ітерацій. Все це стосується АТЗ, які відображені однією, двома, чи трьома клітинками. Прийнято також, що висота клітинки відповідає ширині однієї смуги траси. Заповнена клітинка означає, що смуга повністю зайнята АТЗ у даному перерізі. Автоматом фіксується відносна швидкість переміщення АТЗ. Її числове значення залежить від швидкості АС:

$$V_{r.i} = V_i - V_0, \;\; i = 1 \ldots N_c \tag{6.9}$$

де V_i – абсолютна швидкість i-го ТЗ, м/с; V_0 – абсолютна швидкість АС, м/с; N_c – кількість учасників трафіку, які рухаються попутно з АС.

Для зустрічних АТЗ, швидкість визначається з виразу:

$$V_{r.y} = V_y + V_0, \;\; y = 1 \ldots N_a \tag{6.10}$$

де V_y – абсолютна швидкість зустрічного АТЗ, м/с; N_a – кількість об'єктів потоку, які рухаються по зустрічних смугах відносно АС.

Обчислена за виразом (6.10) відносна швидкість i-го АТЗ може бути від'ємною величиною, якщо її абсолютне значення є меншим, ніж V_0. Отже, переміщення заповнених клітинок в інформаційному полі може бути праворуч, якщо бажана швидкість АТЗ є вищою, ніж бажана швидкість АС, або ліворуч, якщо вона є меншою. Один крок моделювання кліткового автомату – це дискретний час, що відповідає 0,1 с. Таким чином, переміщення заповненої клітинки праворуч, або ліворуч на одну позицію відповідає зміні положення за 1 с на 10 м. Спарені, або трійні клітинки переміщаються одночасно.

Якщо внаслідок моделювання виявиться, що i-а клітинка повинна перемістись за межі R_b або R_f, то це означає, i-й АТЗ зникає з інформаційного поля АС. Новий, або декілька нових об'єктів, які мають випадкові швидкості генеруються у протилежному до його зникнення боці інформаційного поля для того, щоб підтримати задану щільність потоку, отже і чистоту експерименту. Якщо клітинка зникає ліворуч, поза межі R_b, то нова заповнена клітинка з такими ж габаритами, виникає біля правої межі інформаційного поля і

матиме випадкову швидкість $V_i \le V_0$. Якщо ж клітинка i зникає праворуч, поза межі R_f, то нова заповнена клітинка виникає ліворуч, і матиме випадкову швидкість $V_i \ge V_0$. Таким чином, в інформаційному полі підтримується, від кроку до кроку, стала кількість заповнених клітинок. Подібним чином виникають і зникають з інформаційного поля клітинки на інших попутних і зустрічних смугах кліткового автомату.

Кожна заповнена клітинка, або сукупність клітинок на кожній ітерації характеризується такими величинами: $X_{step.i}$ – поточна координата відносно АС; $\Delta X_{step.i}$ – зміна поточної координати відносно АС; $V_{step.i}$ – абсолютна швидкість; $V_{step.r.i}$ – відносна швидкість; $V_{des.i}$ – бажана швидкість, яка обумовлена раціональним режимом руху в заданих дорожніх умовах і умовою дотримання розкладу транспортного процесу; $\Delta V_{step.i}$ – відхилення від бажаної швидкості; $j_{max.i}$ – максимальне допустиме прискорення / сповільнення, обумовлене безпекою руху і динамічними характеристиками автомобіля. У цих позначеннях $step$=0…S – номер ітерації, тобто дискретного інтервалу часу моделювання, i=0..N_c – номер об'єкта, який рухається попутньо з АС, i=1..N_a – номер об'єкта на зустрічній смузі автомата.

Правила переходу заповнених клітинок залежать від подій, які обов'язково відбуваються з АТЗ, якщо склались відповідні умови. Кількість таких подій – скінченна, однак, щонайменше 5. Нами обґрунтовано послідовність реалізації цих подій для усіх клітинок, виходячи з їх пріоритету та з умов безпеки руху.

1. *Гальмування*. На нульовому кроці автомата усі ТЗ, які перебувають в рамках інформаційного поля мають однакову поточну швидкість і розташовані рівновіддалено один від одного. Однак бажана швидкість гурту автомобілів є випадковою величиною, що характеризується законом розподілу Ерланга, або експотенційним, залежно від категорії дороги [239]. Ті клітинки, які розташовані праворуч від інших, і мають бажану швидкість, яка є меншою, ніж бажана швидкість АС, мають бути переміщені ліворуч на таку кількість клітинок, яка відповідає різниці:

$$\Delta X_{step.i} = V_0 - V_i, \tag{6.11}$$

але не більшій, ніж максимальне допустиме сповільнення $j_{max.i}$.

Переміщення ліворуч має виконуватись незалежно від того, чи є вільні клітинки зліва для цього. Таке правило випливає з того, що автомобілі-лідери

завжди мають пріоритет на дорозі, однак вони є обмежені в інтенсивності гальмування. Тому, виконуючи процедуру гальмування, ми вимушені рекурсивно переміщати ліворуч усі заповнені клітинки, які стоять на шляху *i*-ї. Цю процедуру, виходячи з особливостей обчислення переміщень (6.11), потрібно виконувати за порядком координат справа-наліво. Оскільки процедура є досить складною і її моделювання відрізняється від відомих в галузі кліткових автоматів, то наводимо коди процедури, яка виконується для кожної клітинки, яка має $\Delta V_{step,i}<0$ (додаток Д).

2. *Прискорення*. Якщо поточна швидкість *i*-го АТЗ – менша бажаної, тобто $V_{step.i} < V_{d.i}$, то йому потрібно розігнатись до цієї швидкості з прискоренням, яке допустиме для такого маневру, але не перевищує значення $j_{max.i}$. Здійснити це можна, якщо попереду цього об'кта є вільний простір. Після виконання прискорення об'єкт приймає таку швидкість залежно від того, досяг він бажаної, чи ні, і чи є перешкода для виконання подальшого відносного руху. Якщо вільних клітинок попереду об'єкта, який розганяється, немає, то розгін не відбувається. Якщо вільних клітинок є стільки, що $(V_{des.i} - V_{step.i}) \le \Delta X_i$, де ΔX_i є кількість вільних клітинок, то об'єкт набуває швидкості, що дорівнює швидкості попередника.

Якщо $(V_{des.i} - V_{step.i}) > \Delta X_i$, то об'єкт набуває бажаної швидкості.

3. *Обгін, або зміна смуги руху*. Ці маневри моделюються в клітковому автоматі при наявності сприятливих умов і при відсутності обмежень. Обгін є допустимий при відсутності розділової суцільної лінії між смугами і якщо є хоча б одна смуга в кожному напрямку. Обгін заборонений, якщо рух відбувається автострадою. Правила виконання обгону в цьому автоматі є такими. Прискорення об'єкта не повинно перевищувати допустиме максимальне. Обгін розпочинається, якщо на зустрічній смузі, на безпечній відстані відсутній об'єкт, що наближається (нагадаємо, що швидкість зустрічного об'єкта у даному автоматі є приблизно вдвічі більшою, ніж абсолютна швидкість АС). Обгін виконується, якщо перед об'єктом-попередником є не менше двох вільних клітинок; перевірка наявності вільних клітин виконується аналогічно як і для процедури розгону; при дотриманні усіх зазначених вимог обгін виконується автоматично, незалежно від можливої поведінки водія; після виконання обгону об'єкт набуває швидкість, яка дорівнює його бажаній, або швидкості попередника; процедура зміни смуги руху, або ж вертикальне переміщення клітинки в автоматі відрізняється від обгону тим, що потрібно обчис-

лити кількість вільних клітинок позаду об'єкта і при відсутності перешкоди здійснювати маневр.

4. *Переміщення зі сталою швидкістю вліво* здійснюється, якщо об'єкт вже має бажану швидкість, або поточну швидкість, яка є менша, ніж швидкість АС. У цьому випадку перевірка наявності вільних клітин не виконується. Переміщення вліво здійснюється на кількість клітин ($V_{step.i} - V_{des.i}$). Усі об'єкти, які слідують за *i*-м об'єктом, переміщаються також ліворуч на відповідну кількість клітин. Процедура виконується за аналогією з процедурою гальмування. Швидкість усіх переміщених ліворуч об'єктів дорівнює швидкості *i*-го.

5. *Переміщення зі сталою швидкістю праворуч* виконується, якщо $V_{step.i}>V_0$. Перед виконанням цього переміщення знаходять вільні клітини справа.

6. *Корекція координат об'єктів відносно координат АС*. Усі перераховані вище процедури 1-5 стосуються не тільки об'єктів, за якими ведеться спостереження, але й самого АС. Тому після їх виконання може бути ситуація, коли координата місцезнаходження АС а саме X_0 не дорівнює нулю і/або його швидкість відмінна від бажаної. В такому випадку інформаційне поле, тобто сам автомат потрібно переформатувати, змістивши його на величину $0 - X_0$ і перерахувати величину $\Delta V_0 = V_{0.i} - V_0$. Ця величина є функціоналом, який потрібно визначити після *S* кроків моделювання:

$$\Delta V_{0.\Sigma} = \sum_{S} \Delta V_{step.0} \tag{6.12}$$

В результаті корегування швидкості та координат АС деякі об'єкти автомата можуть виявитись поза межами інформаційного поля. Їх потрібно вилучити з наступного кроку моделювання і замінити введенням нових так, як про це було описано вище. При переході до наступної ітерації передаються ті ж параметри керування і обчислюється числове значення функціонала:

$$\Delta V_{i.\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_c} \Delta V_{step.i} \tag{6.13}$$

Алгоритм імітаційного моделювання складається з вищеописаних процедур (рис. 6.6) і реалізований у середовищі алгоритмічної мови *Delphi* (Див. додаток Д).

Розроблену методику і алгоритм моделювання транспортного потоку було застосовано на прикладі на автомобільній трасі Е-471 Київ-Чоп. Магіст-

раль має дві смуги, по одній в протилежному напрямі. Категорія дороги – 2. Щільність потоку змінюється на ній в межах 25…150 автомобілів /км. Склад потоку приймався: 100% легкових автомобілів.

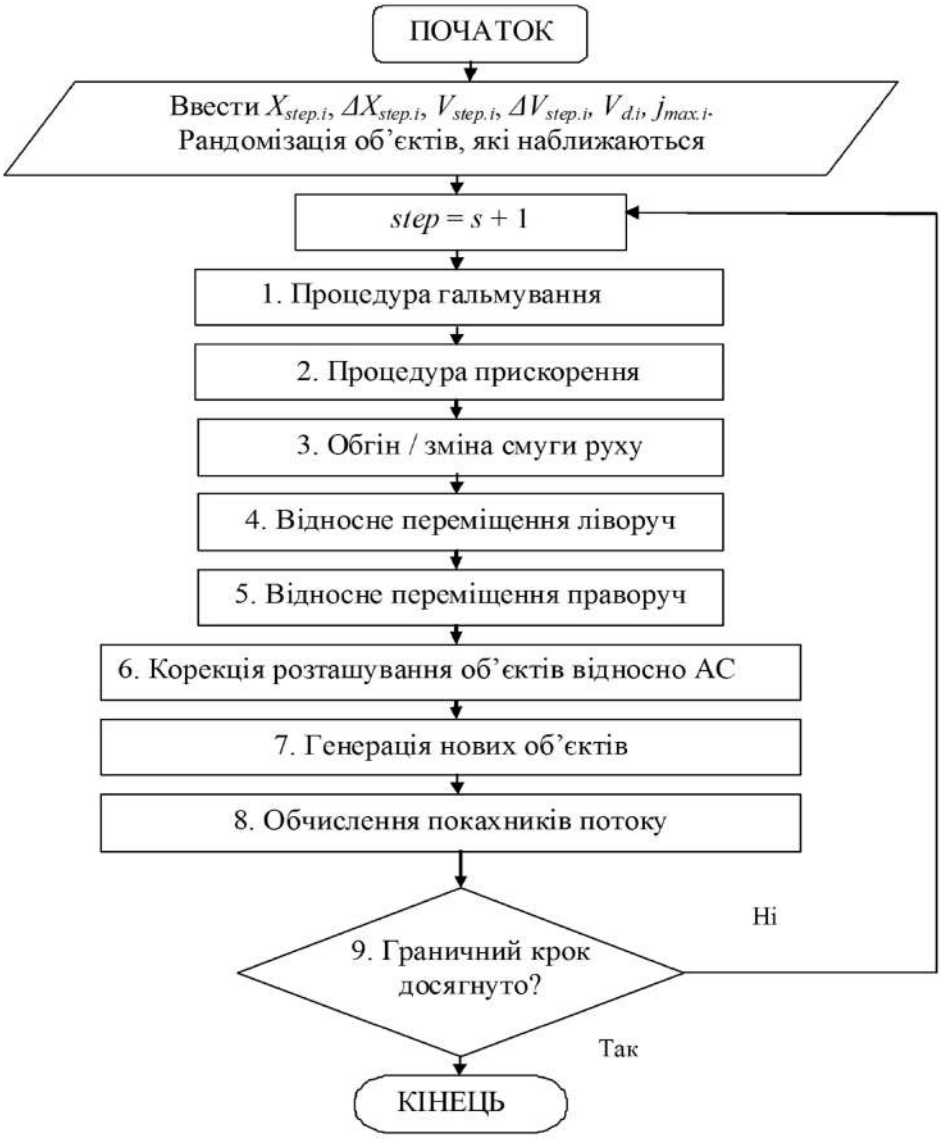


Рисунок 6.6 – Блок-схема алгоритму імітаційного моделювання транспортного потоку на двохсмуговій дорозі з дозволеним обгоном

Встановлено експоненційний закон розподілу бажаних швидкостей АТЗ із такими параметрами розподілу, а саме: математичне сподівання: 16 м/с, стандартне відхилення – 3,5 м/с. Максимальне прискорення автомобілів (враховуючи можливу наявність на магістралі легкових автомобілів спортивного класу) – 5 м/с^2 (відповідає розгону АТЗ від 10 до 20 м/с за 2 с), максимальне сповільнення – 3 м/с^2. Розглядалась ділянка траси Е-471, а саме Стрий-Пісочне. Протяжність – 20 км. Дорога траси є прямолінійною, має сталий

профіль в плані. Дозволена максимальна швидкість – 25 м/с. Тут практично відсутні перетини і примикання. Дійсна середня швидкість руху ТЗ по цьому маршруту згідно Google Map – 16,6 м/с. Початкові дані змінювались таким чином: задавались різні значення відносної швидкості автомобілів потоку від бажаної швидкості АС (додаток Е). При цьому даних введено оцінки:

1) коефіцієнт нерівномірності швидкостей:

$$\eta_V = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{\overline{V}}, \tag{6.14}$$

де $V_{\max}$, V_{min}, $\overline{V}$ – швидкість об'єктів в полі автомата, відповідно, максимальна, мінімальна та середня;

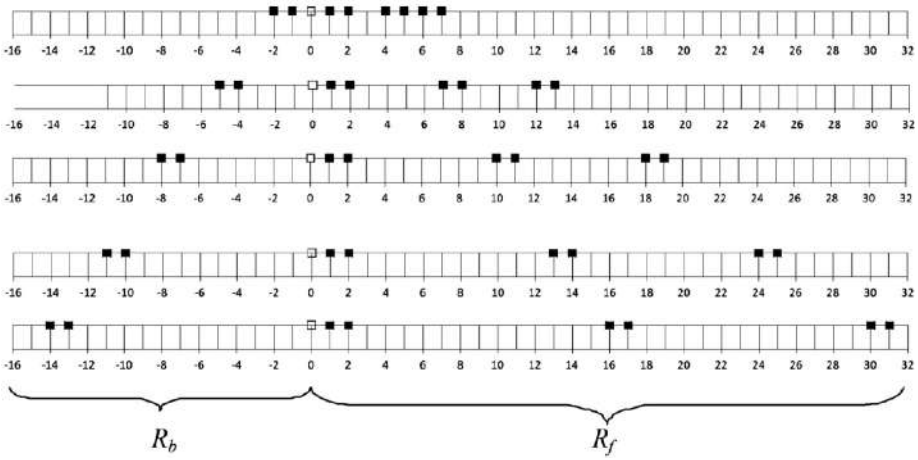
2) середньоквадратичне відхилення швидкостей σ_V;

3) середнє відхилення від математичного сподівання:

$$\Delta x_{av} = \frac{1}{N_c} \sum \left| x_i - \bar{x} \right|, \tag{6.15}$$

4) абсолютне відхилення середньої швидкості об'єктів від АС ΔV_{av}.

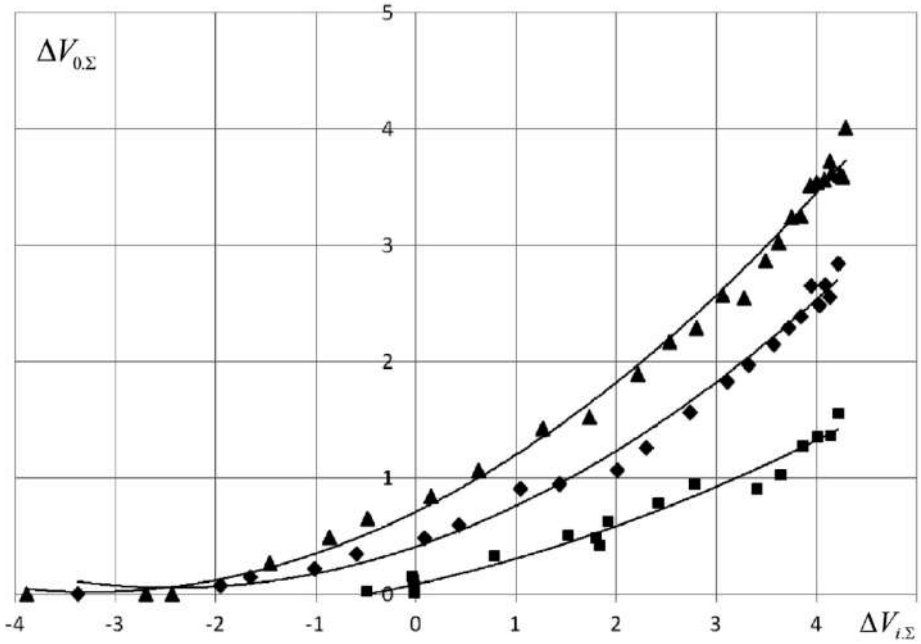
Коли, наприклад, згідно з табл. дод. Е1, середнє значення швидкості потоку становить 20,25 м/с зі стандартним відхиленням 1,25 м/с, то при щільності потоку 16 автомобілів/км в інформаційному полі АС довжиною 480 м буде 8 автомобілів + АС, на попутній смузі і розподіл їх швидкостей буде таким: 20; 22; 21; 21; 20; 20; 19; 19; 18. Нижче, на рис. 6.7 наведено приклад п'яти ітерацій для цього варіанту початкових даних.



■ – ТЗ, об'єкт транспортного потоку □ – автомобіль-спостерігач

Рисунок 6.7 – Схема п'яти кроків ІМ кліткового автомату

При використанні радарів інформаційне поле автомату є несиметричне: позаду воно становить 16 клітин (160 м), попереду – 32 клітини (320 м). З них видно, що початкова група автомобілів, які рухаються в кучній колоні через різницю швидкостей розпорошуються вздовж кліткового автомату і, зрештою, 4 з них виходять за межі оглядової доступності. Однак, наявність трьох автомобілів з швидкостями, нижчими, ніж бажана швидкість АС, а саме 19, 19, 18 м/с призводять до сукупних затримок АС на маршруті на 1 м/с на довжині 20 км. Ці дані було введено в програму і отримано залежності середніх затримок автомобіля з бажаною швидкістю 20 м/с залежно від відносної швидкості інших учасників транспортного потоку (рис. 6.8). Отримані результати моделювання для різних аргументів ΔV_{av} приводять до зміни дійсної швидкості АС по відношенню до його запланованої швидкості (дод. Є).



▲ – щільність потоку 40 автомобілів / км
♦ – щільність потоку 28 автомобілів / км
■ – щільність потоку 16 автомобілів /км

Рисунок 6.8 – Експериментальні результати моделювання зміни швидкості АС залежно від зміни параметрів потоку, та теоретична апроксимація

Якщо цю величину позначити як y, а ΔV_{av} – як x, то можна отримати такі рівняння регресії:

для щільності потоку 40 авто/км: $y = 0{,}06x^2 + 0{,}2917x + 0{,}4109$;

для щільності потоку 28 авто/км: $y = 0{,}0297x^2 + 0{,}1908x + 0{,}0869$;

для щільності потоку 16 авто/км: $y = 0{,}0653x^2 + 0{,}425x + 0{,}7113$.

Коефіцієнти рівняння регресії отримано з допомогою функції «тенденція» в електронних таблицях *Excel*, яка виконує побудову рівняння регресії на основі емпіричних даних за методом найменших квадратів. Величина достовірності апроксимації емпіричних даних для усіх трьох залежностей є більша, ніж 0,97, що свідчить про хорошу узгодженість.

Адекватність імітаційної моделі не може бути підтверджена статистичними дослідженнями, оскільки сама методика спирається на логічних методах керування усіма АТЗ потоку, що характерно для автоматичних транспортних систем і зовсім не характерно для сучасних автострад, де рішення приймаються на основі, переважно, суб'єктивних висновків. З іншого боку, внаслідок надзвичайно простої конфігурації даної імітаційної моделі, характеристики руху трафіку руху не можуть бути описані нею із задовільним виконанням, тобто так, як було сформоване ідеальне його бачення. Модельований транспортний потік на автомагістралях, особливо на європейських автомагістралях, не може представляти реальні залежності швидкості та щільності потоку. Аналізуючи деталі представленої тут імітаційної моделі, на мікроскопічному рівні знаходимо такі нереальні риси, які характерні й для інших кліткових автоматів [240]:

1) прискорення і сповільнення виконуються з нереальною інтенсивністю, що пов’язано з психофізіологічними особливостями водіїв, особливо непрофесіоналів;

2) максимальне прискорення є більшим, ніж максимальне сповільнення, що насправді також залежить від стану дороги і уміння водія;

3) рішення про обгін/зміну смуги руху водіями не завжди приймається так однозначно, як це робить даний автомат;

4) моделювання багатосмугових автострад, а також наявність дорожніх розв’язок потребує додаткових правил імітації.

Однак, якщо взяти до уваги відомі залежності середньої швидкості транспортних засобів від щільності потоку односмугових автострад, то запропонована нами модель дає цілком адекватні їм результати [226].

Як видно з рис. 6.8, усі три залежності (це ж характерно і для щільності потоку більшої величини) – це є параболи, частина яких заходить за вертикаль вісь ординат. Ліва по відношенню до початку координат частина кожної залежності описує ті ситуації, коли АС має бажану швидкість, яка є менша, ніж середня швидкість потоку. Наявність «швидких» автомобілів в його інформаційному полі зумовлює незначні затримки впродовж руху по заданому відрізку траси. Наявність технічних засобів визначення відносної швидкості дає йому можливість дотримуватись запланованого розкладу руху. Однак, затримки стрімко зростають, коли середня швидкість потоку стає меншою, тобто коли у потоці з'являються «повільні» транспортні засоби, які вимушують змінити поточну швидкість усіх інших, у тому числі АС. Телеметричні засоби АС, у тому числі, засоби для визначення відносної швидкості автомобілів у потоці, засоби телекомунікації можуть бути використані для того, щоб скорегувати його власний розклад. Адже знаючи величину ΔV_{av}, при відомій щільності потоку, можна визначити прогноз бажаної швидкості на яку завгодно дистанцію маршруту.

6.3 Аналіз потоку даних та якості керування рухом АТЗ на магістралі

Розглядався рух АТЗ по магістральних дорогах міжміського маршруту. Задано початковий і кінцевий пункти маршруту. Відома довжина поїздки L_{max}. Поточна швидкість V АТЗ змінюється залежно від дорожніх і транспортних умов. Припускалось, що дорожні умови, тобто рельєф, план і профіль траси, стан дорожнього покриття, є відомі. Такі умови для заданого АТЗ можна описати програмою вільного руху $V_i(x)$ – швидкістю, що змінюється по довжині маршруту x=[1,L_{max}]. Оптимальною в даному випадку назвемо програму руху, яка забезпечує найбільшу паливну ощадність при умові відсутності перешкод, які спричинюють затримки, затори та інші вимушені зміни швидкості. Враховуючи відомі дослідження, можна стверджувати, що будь-яке відхилення від $V_i(x)$ (збільшення, або зменшення швидкості) приводять до збільшення витрат ресурсів [343]. При цьому існує обмеження максималь-

ної абсолютної швидкості $V_{a.\max}$, таке, що $V(x) \le V_{a.\max}$ для транспортного засобу заданого класу. Розглядалась програма руху, яка складається з відносної швидкості $V_i(x)=V(x)/V_{a.\max}$. Отже, $0<V_i \le 1$. Надалі під $V(x)$ розумітимемо відносну швидкість, взяту як частку від максимальної швидкості $V_{a.\max}$ для даного АТЗ. Шлях маршруту можна поділити на достатньо малі ділянки x_i такі, на яких швидкість $V(x) \ge 0$ вважається сталою, без суттєвого погіршення точності розрахунку. Кожна ділянка x_i є найменшою одиницею вимірювання відстані, яку проїхав АТЗ. Таким чином, оптимальна програма руху – це множина дискретних значень $V_i(x)$, при $0<x \le L_{max}$. За програмою $V_i(x)$ розраховуються моменти часу оптимального розкладу руху транспортного засобу $0<t_i<T_x$, де T_x – оптимальний час прибуття в кінцевий пункт маршруту. Орієнтуючись на цей розклад, вибираємо час відправлення з початкового пункту маршруту, щоб саме вчасно прибути в кінцевий пункт. У зв'язку з тим, що на автостраді виникають ситуації, при яких потрібно пригальмувати, то, при умові наявності відповідної інформації, водій знижує швидкість до деякого значення $V_{max}(x)$ на ділянці x. Такими ситуаціями є збільшення густини транспортного потоку, підвищення аварійної небезпеки внаслідок погодних, природничих чи інших умов. Таким чином, швидкість $V_{max}(x)$ є обмеженням у застосуванні оптимальної програми руху і дотримання відповідного графіка, якщо $V_{max}(x)<V_i(x)$. Враховуючи мету досліджень, швидкість $V_{max}(x)$ прийнято основним параметром, що характеризує транспортні умови на магістралі. Однак, виконання розкладу руху по заданому маршруті можна забезпечити, якщо передбачити $V_{max}(x)$ на деяку дистанцію маршруту W, яку назвемо *горизонтом прогнозування*. При наявності такої інформації можна виявити ті ділянки маршруту, на яких $V_{max}(x)>V_i(x)$. На таких ділянках швидкість можна збільшити від оптимальної $V_i(x)$ до максимальної $V_{max}(x)$. Це є певним ресурсом часу, який можна використати, відхилившись від оптимальної програми, але дотримуючись розкладу. Зроблено припущення, що, чим більший горизонт прогнозування W, тим більше є можливостей дотриматись оптимальної програми $V_i(x)$. Адже, якщо поділити увесь шлях маршруту $L_{\max}$ на ділянки роз-

міром W, то можна отримати загальну кількість ділянок, на кожній з яких водій отримує одне інформаційне повідомлення:

$$L = \left\lceil \frac{L_{\max}}{W} \right\rceil. \tag{6.16}$$

З (6.16) зрозуміло, що, чим більший горизонт прогнозування W, тим менше оперативних інформаційних повідомлень надійде водієві, отже прийняті рішення на кожній l-й ділянці маршруту важче змінити.

Зауважимо, що на даний час засоби прогнозування транспортних умов на автошляхах ще не досягли такого рівня, щоб давати цілком вірогідну і точну інформацію на довготерміновий період (не менше, як на 60 хвилин) [102]. Водночас, густина потоку впродовж деякого інтервалу часу Δt може стрімко змінюватись. З отриманої залежності (див рис. 6.8) можна стверджувати, що стандартне відхилення прогнозованої густини транспортного потоку нелінійно залежить від горизонту прогнозування. Дослідимо вплив розміру горизонту прогнозування W на можливість виконати оптимальну програму руху $V_i(x)$, при дотриманні заданого розкладу $t_x(x)$. Зміст задачі дослідження є таким. На магістралі з характеристиками $V_i(x)$ потрібно вибрати таку множину значень середніх швидкостей $V(x)$ на ділянках x=1, 2, … x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, … $L_{\max}$, для яких перепишемо вираз (6.1) в такому виді:

$$\sum_{x=1}^{L_{\max}} \left(\left| V_i(x) - V(x) \right| \right) \to \min, \tag{6.17}$$

при умові, що АТЗ прибуде у кінцевий пункт маршруту не пізніше запланованого часу $T_x = t_x(L_{\max})$. Вибір швидкостей здійснюється в межах одної дистанції W. Вибір потрібно здійснювати з врахуванням дозволених максимальних швидкостей $V_{\max}(x)$, які є відомими тільки на ділянці горизонту прогнозування W. При цьому дійсна інформація про обмеження швидкостей може бути спотворена.

Задача у такому формулюванні відомими точними, або евристичними методами не може бути розв’язана [344]. Для вирішення поставленої задачі, а також для дослідження впливу горизонту прогнозування на вибір швидкості

розроблено і застосовано методику й відповідний алгоритм ІМ. Зміст його полягає у тому, що на основі випадково згенерованих масивів даних про дорожні і транспортні умови виконується вибір програми руху в межах *W*. Вибір проводиться за наперед встановленими детермінованими правилами. Змінними в моделюванні є розмір горизонту прогнозування і, відповідно, кількість ділянок *L*. Початковими масивами вхідних даних ІМ є масив оптимальних швидкостей $V_i(x)$, масив максимальних по обмеженню транспортних умов $V_{\max}(x)$. Ці масиви попередньо було отримано з використанням генератора випадкових чисел за виразами:

$$V_i(x) = \left(V_{i.\min} + \left(V_{i.\max} - V_{i.\min}\right) \cdot Random\right), \tag{6.18}$$

$$V_{\max}(x) = \left(R_{\min} + \left(R_{\max} - R_{\min}\right) \cdot Random\right), \tag{6.19}$$

де $V_{i.\min}$, $V_{i.\max}$ – мінімально і максимально можлива швидкість АТЗ, згідно з оптимальною програмою руху; *Random* – випадкове число [0;1), отримане генератором випадкових чисел [0]; $R_{\min}$, $R_{\max}$ – мінімальне і, відповідно, максимальне можливе значення обмеження на швидкість АТЗ через параметри трафіку.

Крім $V_i(x)$ і $V_{\max}(x)$ використовуються додаткові змінні та масиви. $V_{w.\max}(x)$ – масив обмежень по максимальній швидкості, який сформовано в результаті рандомізації по дистанції *W*. Якщо в ІМ масив $V_{\max}(x)$ вважається наперед невідомим, однак інформація про цей масив є невизначеною, то масив даних $V_{w.\max}(x)$ для водія є відомим, але тільки на горизонт планування *W*. Масив $V_{\max}(x)$ обчислюємо за виразом:

$$V_{w.\max}(x) = V_{\max}(x) \cdot \left(1 - random(W)/W\right), \tag{6.20}$$

де *random*(*W*) – випадкове число в межах [0;*W*].

Відповідно до виразу (6.20) точність визначення $V_{\max}(x)$ зменшується зі зростанням *W*. $\overline{V}$ – середня швидкість на маршруті за програмою $V_i(x)$:

$$\overline{V} = \frac{\sum_{x=0}^{L_{\max}} V_i(x)}{L_{\max}}. \tag{6.21}$$

$T_z(x)$ – запланований час проїзду ділянки x, який визначається тільки в тільки межах горизонту прогнозування W за формулою:

$$T_z(x) = T_z(x-1) + \frac{1}{\min\left(\overline{V}, V_{\max}(x)\right)}. \tag{6.22}$$

$V_z(x)$ – запланована швидкість на ділянці x, яка визначається тільки в межах горизонту прогнозування W; $\overline{T}(x)$ – середній плановий час проходження ділянки x маршруту, визначається за середньою швидкістю $\overline{V}$:

$$\overline{T}(x) = \frac{x}{\overline{V}}. \tag{6.23}$$

Зміст методики ІМ полягає у тому, що дійсна програма керування $V(x)$ планується щоциклу, при зміні ділянок x в межах $(x_{i+w} - x_i) = W$. На довжині такого циклу здійснюється вибір швидкості $V(x)$ в рамках програм $V_{w.\max}(x)$ і $V_i(x)$. При цьому дозволене відхилення $V(x) > V_i(x)$, або $V(x) < V_i(x)$, якщо це вимушено транспортними умовами, однак заборонене відхилення $V(x) > V_{w.\max}(x)$. Оскільки програма $V_{w.\max}(x)$ є апроксимована за змістом відносно дійсних обмежень швидкості $V_{\max}(x)$, то в кінці кожного циклу виконується корекція програми $V(x)$ на наступний цикл, на основі бажаної швидкості, яка мала б бути досяжною в кінці прогнозованої дистанції. Середня бажана швидкість на дистанції W визначається за виразом:

$$V_{des} = \frac{W}{T_z(W \cdot x + W) - T_x(W \cdot x)}, \tag{6.24}$$

де $T_z(W \cdot x + W)$ – плановий час проїзду кінцевої ділянки горизонту прогнозування W, який обчислено за виразом (6.22); $T_x(W \cdot x)$ – фактичний час приїзду на початок дистанції з врахуванням відхилень від оптимальної програми $V_i(x)$. Коригування розкладу – через пошук ймовірних резервів часу:

$$D(x) = V_{w.\max}(x) - V(x). \tag{6.25}$$

Знайдена множина значень $D(x)$ сортується в спадному порядку. Після цього, використовуючи принцип і алгоритм Джонсона [346], вибираються спочатку ті ділянки, де резерв збільшення швидкості є мінімальним і для них встановлюється вища, ніж запланована швидкість $V(x):=V_{w.\max}(x)$. Далі перевіряється досяжність запланованого алгоритму і, якщо час проходження кінцевої ділянки дистанції відповідає розкладу, то корекція завершується. В іншому випадку вибирається наступний наявний резерв вимушеного збільшення швидкості. Таким чином відбувається динамічне наближення до оптимального розв'язання задачі вибору програми руху. Алгоритм Джонсона забезпечує апроксимовану оптимізацію. Блок-схема алгоритму ІМ подана на рис.6.9, 6.10. Для виконання ІМ було підготовлено початкові дані, які описують магістральну дорогу, на якій встановлено обмеження швидкості. Аналог початкових даних стосується частини траси європейського автомобільного маршруту Е-372 на ділянці маршруту Тернопіль – Львів станом на початок 2020 року. Максимальний транспортний потік становить 32 тис. автомобілів на добу. На більшості своєї довжини дорога має дві смуги руху, шириною 3,75 м, які не мають роздільної смуги. Немає кільцевих транспортних розв'язок. Натомість є дорожні споруди для обмеження максимальної швидкості перед пішими переходами. Максимальна швидкість на дорозі обмежена до 25 м/с. Для характеристики профілю дорожніх умов було застосовано математичне сподівання $E(V_i)$ та стандартне відхилення швидкості $\sigma(V_i)$. Для моделювання траєкторії максимальних швидкостей по трафіку застосовано математичне сподівання швидкості $E(V_{\max})$ та стандартне відхилення $\sigma(V_{\max})$. Завдяки таким оцінкам отримана можливість впорядкувати вхідні дані, які отримані за генератором випадкових чисел за виразом (6.18). Початкові дані підготовлено для автостради довжиною $L_{\max}$=125000 м. Найменша ділянка маршруту є x=25 м, що відповідає максимальній габаритній довжині вантажного автопоїзда з декількома причепами. Таким чином, $L_{\max}$= 5000x.

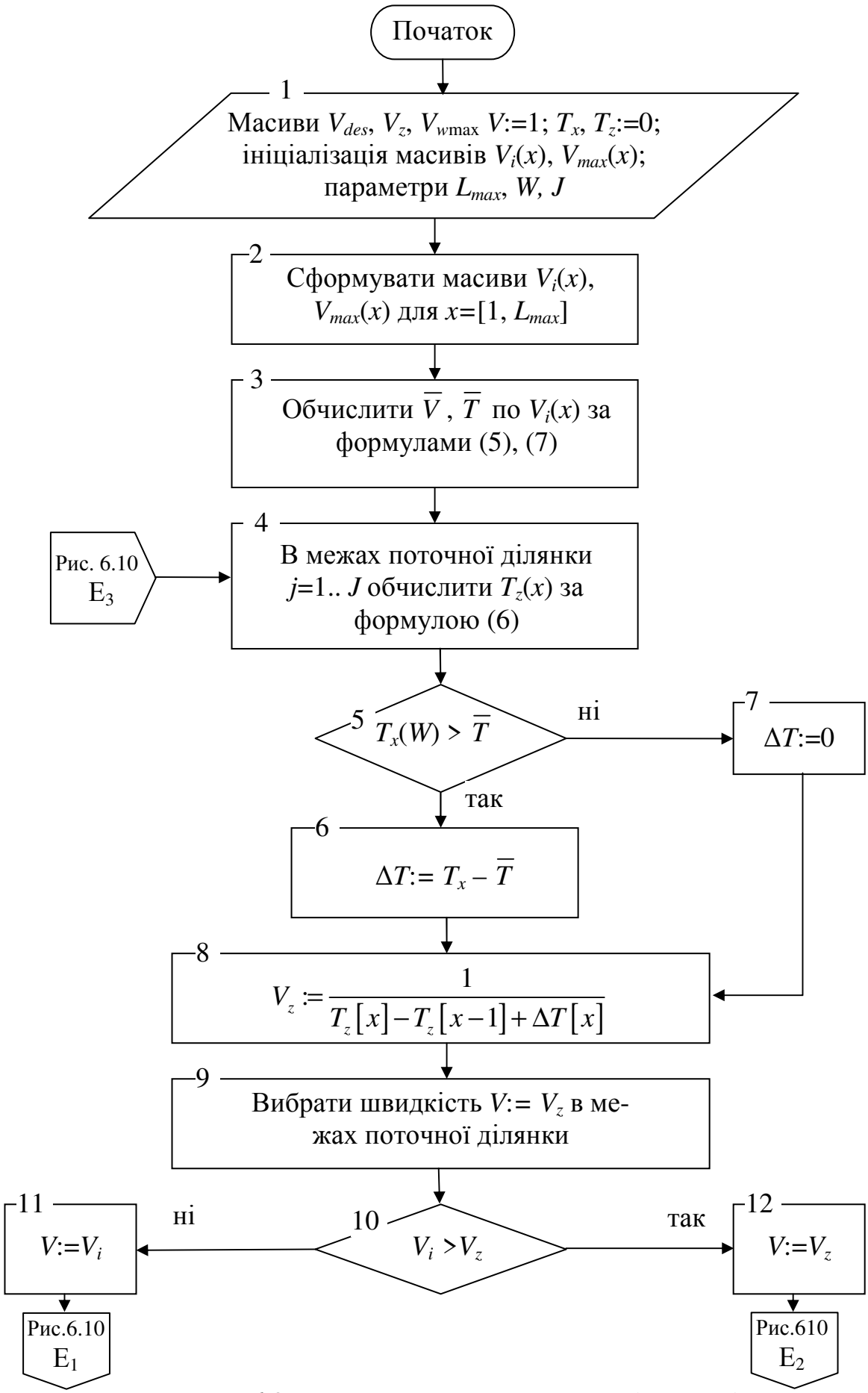


Рисунок 6.9 – Блок-схема алгоритму ІМ (початок)

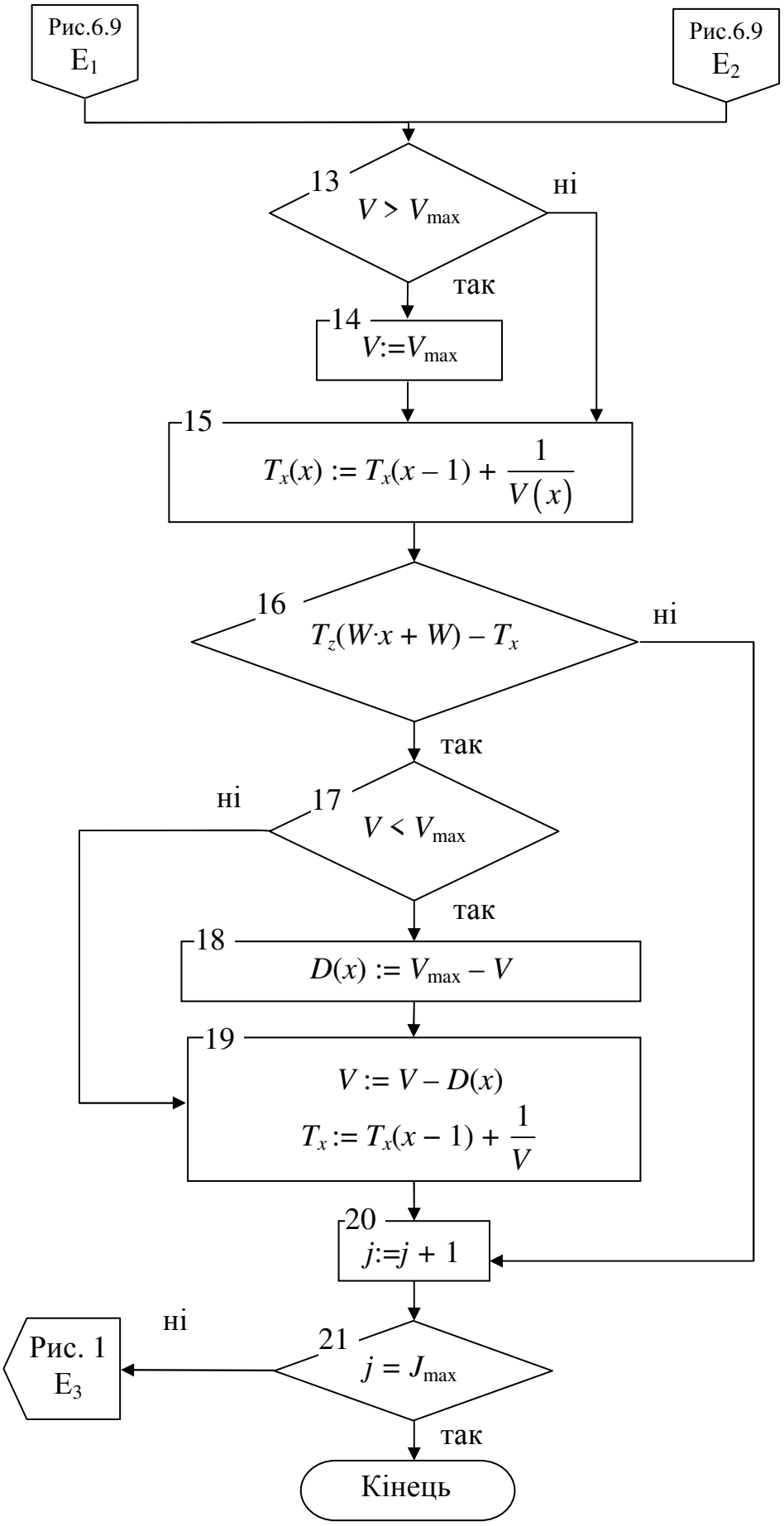


Рисунок 6.10 – Блок-схема алгоритму ІМ (продовження)

Горизонт прогнозування W змінювався в межах $10x…5000x$. Дорожні умови приймались сталими на усьому маршруті. Характеристики дорожніх умов: $E(V_i)$=0,85, $\sigma(V_{max})$=0,0012. Застосовано 14 наборів початкових даних стосовно різних транспортних умов, які спостерігались на трасі Тернопіль-Львів. Характеристики подані в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Характеристика початкових даних

Показник	1	2	3	4	5	6	7
$E(V_{max})$	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
$\sigma(V_{max})$	0,0040	0,0033	0,0025	0,0016	0,0008	0,0004	0,0002
Показник	8	9	10	11	12	13	14
$E(V_{max})$	0,70	0,75	0,75	0,75	0,75	0,85	0,85
$\sigma(V_{max})$	0,0024	0,0020	0,0012	0,0004	0,0000	0,0012	0,0033

Приклад фрагменту траєкторії швидкості для набору №13 – на рис. 6.11.

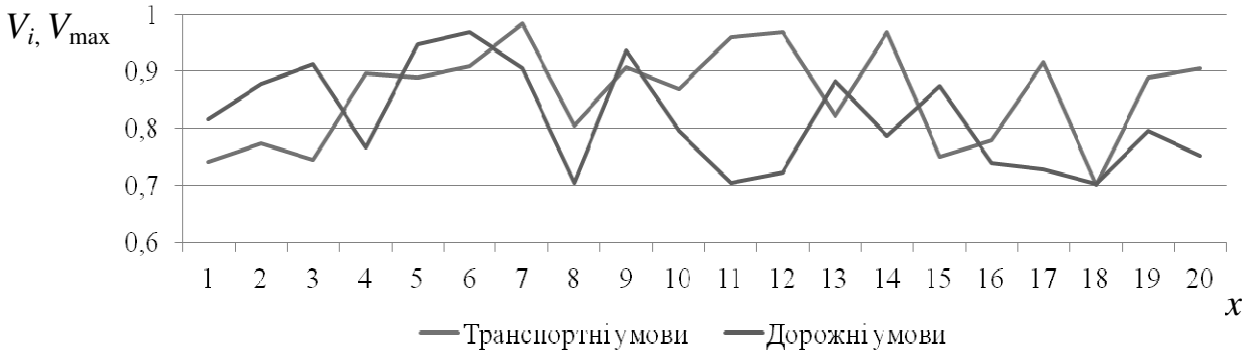


Рисунок 6.11 – Фрагмент профілю швидкості, обмеженого дорожніми й транспортними умовами

З поданого фрагменту вхідних даних видно, що швидкість АТЗ може змінюватись, враховуючи дорожні і транспортні умови в межах $V\in$ [0,7; 1,0]. Абсолютна максимальна швидкість АТЗ прийнята $V_{a.max}$ = 25 м/с. Графік показує, що є такі ділянки, на яких швидкість V_i є обмеженням для V. Також є ділянки, на яких V_{max} є обмеженням для V. Це означає, що при виборі і корегуванні програми руху водій повинен керуватись трьома величинами: V_i, V_{max}, V_z. ІМ було двохстадійне. На першій стадії згенеровано масиви початкових даних $V_i(x)$ та $V_{max}(x)$ за виразами (6.18) і (6.19). Масиви було перевірено на наявність помилково згенерованих даних, що не відповідають практичним даним, взятим з аналогу траси. На другій стадії застосовано розроблений алгоритм ІМ, для моделювання вибору швидкості АТЗ при використанні поча-

ткових даних і застосуванні прогнозування на дистанцію *W*. Горизонт прогнозування у кожному наборі вхідних даних змінювався циклічно. ІМ було виконане із застосуванням комп'ютерної програми на мові Делфі, що базується на запропонованому алгоритмі (додаток З).

Для оцінювання якості керування транспортним засобом при наявності динамічного прогнозу швидкості застосовано такі показники, як абсолютне сумарне відхилення від оптимальної програми *DV*, та відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT.

$$DV = \sum_{x=1}^{L_{\max}} \sqrt{\left(V(x) - V_i(x)\right)^2}. \tag{6.26}$$

$$\Delta T = t\left(L_{\max}\right) - T_{\max}, \tag{6.27}$$

де $t(L_{\max})$ – тривалість проходження останньої ділянки маршруту.

В результаті ІМ було отримано залежності $DV(W)$, $\Delta T(W)$ (рис.6.12-6.15).

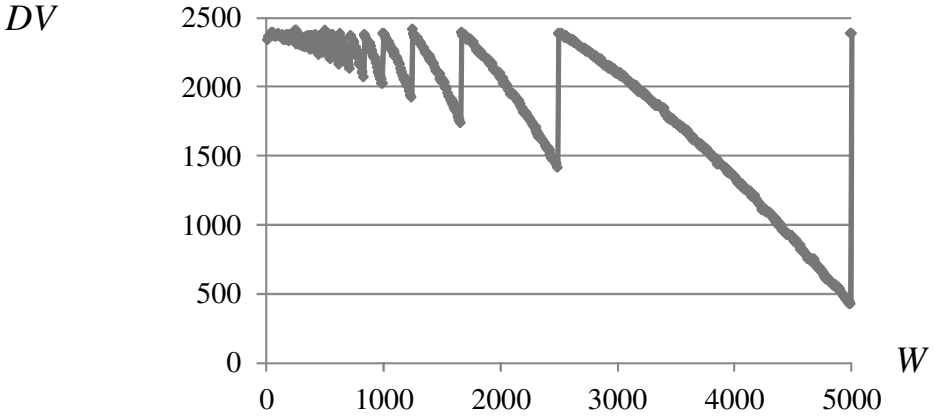


Рисунок 6.12 – Залежність сумарного відхилення *DV* програми від горизонту прогнозування *W* при $\sigma(V_{\max})$=0,0033 і $E(V_{\max})$=0,5

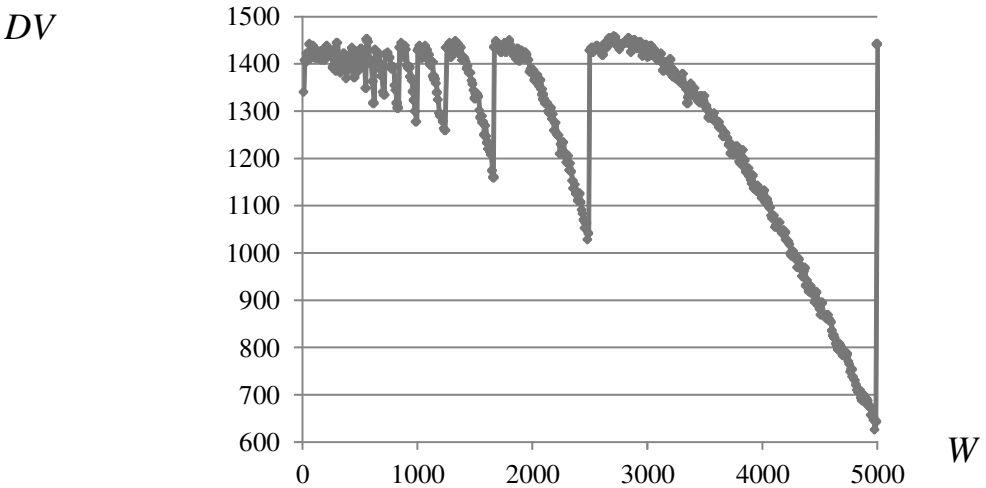


Рисунок 6.13 – Залежність сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* від горизонту прогнозування *W* при $\sigma(V_{\max})$=0,000 і $E(V_{\max})$=0,85

Залежності $DV(W)$ на рис. 6.12, 6.13 подано для двох наборів даних: №2 і №12 (див. табл. 6.1). Набір №2 характеризується низьким значенням середньої швидкості, але відносно високою дисперсією. Тобто потік даних про цей набір є інформаційно насиченим. Для цього набору потрібно багато інформації, бо транспортні умови тут є досить мінливими. Натомість, набір № 12 – це майже детерміновані умови руху, якщо не брати до уваги дорожні умови. Стандартне відхилення $\sigma(V_{max})=0$, обмеження по швидкості має досить високе значення $V_{max}=0{,}85$. Порівнюючи залежності на рис. 6.12 і 6.13, бачимо що відхилення від оптимальної програми з більшою дисперсією вхідних даних значно перевищує стабільні транспортні умови. Залежності якості керування запропонованою системою для інших наборів згенерованих випадкових даних, що представлені в табл. 6.1, подано в додатку К.

Залежності DV від W мають чітко виражений кусково-неперервний характер. Наявність стрибків графіків пояснюється не тільки кратністю значень горизонту планування W і довжини маршруту L_{max}, а й тим, що залежність $DV(W)$ явище переходу кількості інформації в якість. Так, при збільшенні W поле змінних величин V також зростає, що дає змогу вибрати програму руху на дистанції W, що є ближчою до оптимальної $V_i(x)$. Однак, зростання W знижує вірогідність потоку даних доти, поки отриманий обсяг інформації стосовно $V_{max}(x)$ вимушує прийняти взагалі неадекватне рішення.

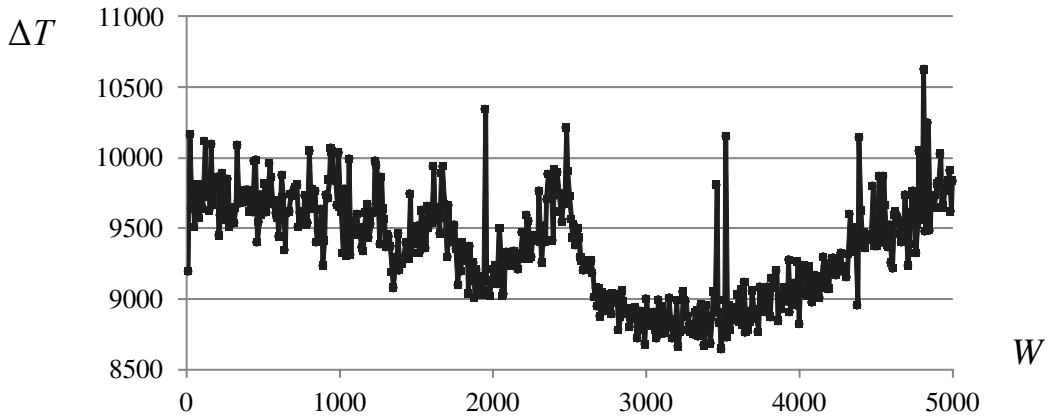


Рисунок 6.14 – Залежність сумарного відхилення оптимального розкладу від горизонту прогнозування W при $\sigma(V_{max})=0{,}0033$ і $E(V_{max})=0{,}5$

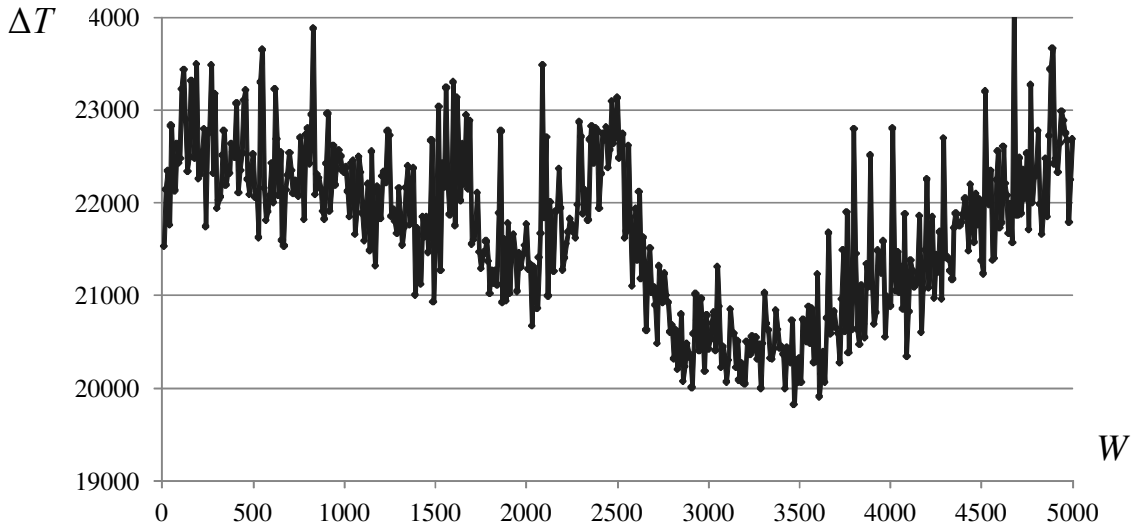


Рисунок 6.15 – Залежність сумарного відхилення оптимального розкладу від горизонту прогнозування W при $\sigma(V_{max})=0,0$ і $E(V_{max})=0,85$.

Подальше зростання горизонту W обумовлює необхідність корекції системи контролю. Якість керування за показником DV покращується. Так відбувається до наступної якісної зміни. Таким чином, розриви функції $DV(W)$ пояснюються переростанням кількості інформації в якість, яка відбувається для визначених значень горизонту прогнозування.

Залежності $\Delta T(W)$ (рис. 6.14, 6.15) мають менш виразний монотонний вигляд. Однак стрибки значень цих залежностей відображається, приблизно, при тих самих значеннях W. Порівнюючи результати для різних вхідних наборів, бачимо, що дисперсія вхідних даних не впливає на якість процесу керування транспортним засобом за параметром ΔT так, як це робить математичне сподівання швидкості V_{max}. На рис. 6.15 подано залежність, яка показує, що відхилення від оптимальної програми з $E(V_{max})=0,85$ майже вдвічі перевищують результати, отримані при $E(V_{max})=0,5$. Мінімальне значення стандартного відхилення майже не впливає на якість контролю процесу.

Результати ІМ відкривають нові можливості для впровадження ІТС на магістральних дорогах. Це проявляється у виявлених явищах приймання і використання інформаційних потоків. Головною закономірністю процесу керування АТЗ в умовах міжміських перевезень є те, що оптимальний обсяг прогнозованої інформації, якою має бути забезпечений водій, залежить від дорожніх і транспортних умов. Дослідження вдалося провести, оцінюючи

якість керування транспортним засобом за відхиленнями від оптимальної програми за енергоощадністю та відхиленнями від запланованого розкладу. За такими критеріями можна запропонувати декілька оптимальних співвідношень обсяг/кількість повідомлень про дорожні і транспортні умови. Враховано те, що зусилля сучасних дослідників спрямовані на підвищення точності сканування умов і прогнозування швидкості транспортного засобу в потоці. У зв'язку з цим запропонована залежність, методика і алгоритм контролю забезпечують високий рівень ефективності керування навіть при наявному рівні технічного і алгоритмічного забезпечення прогнозування.

На відміну від відомих алгоритмів вибору траєкторії швидкості АТЗ у цій роботі показано об'єктивну необхідність динамічного дискретного керування. Обґрунтування оптимального горизонту прогнозування підвищує точність і гарантує вищу якість контролю траєкторії швидкості. Завдяки запропонованому алгоритмічному забезпеченню вдалося виявити явище перетворення кількості інформації про дорожні і транспортні умови в нові якісні. Так, при зростанні горизонту прогнозування W і сталості транспортного завдання сумарна кількість повідомлень J, які отримує водій / екіпаж АТЗ зменшується. Обсяг кожного з таких повідомлень, водночас зростає, але не безперервно. Лише при певних значеннях W можна отримати стрибкоподібне зростання якості контролю завдяки оптимізованому потоку даних. Виявлені закономірності і алгоритми керування транспортним засобом можуть бути використані в сучасних системах адаптивного круїз-контролю.

6.4 Забезпечення оптимальною кількістю інформації магістральних АТЗ у транспортному потоці для вибору швидкості руху

Для розроблення концепції циклічного руху АТЗ вздовж магістралі сформульована така задача. На горизонтальній прямолінійній дорозі маршруту (наприклад, автомагістралі) автомобіль можна з достатньою точністю розглядати як матеріальну точку [347], рівняння руху якого:

$$m\ddot{x} = P_k(t) - P_o - P_w(\dot{x}), \tag{6.28}$$

де m – маса автомобіля, приведена до центру мас, кг; x– поточна координата автомобіля, м; $P_k(t)$ – керована рушійна сила на провідних колесах, Н; P_o – сила опору руху, пов'язана з деформацією рушіїв і дорожнього полотна (стала величина), Н; $P_w(\dot{x})$ – сила опору потоку повітря, Н.

Якщо дорожні умови з достатньою точністю визначені бортовою телеметричною системою автомобіля на деяку відстань W наперед, то рівняння (6.28) можна записати, використавши умовні величини, так:

$$\ddot{x} = u(t) - f_o - f_w \dot{x}^2, \tag{6.29}$$

де $u(t)$ – відносна величина, або ж рушійна сила, віднесена до одиниці повної маси автопоїзда; f_o, f_w – сталі величини, що відображають питомий на одиницю маси автомобіля відносний опір руху, який поділяють на, відповідно, залежний від профілю дороги, залежний від швидкості руху автопоїзда, залежний від потоку повітря.

Потрібно знайти оптимальну за критерієм мінімальних енергетичних витрат функцію $P_k(t)$ керування рухом автопоїзда. На відміну від відомих моделей [348], тут приймалось, що під час транспортного циклу енергія не розсіюється на вимушене зниження швидкості, тобто не витрачається на гальмування. Це зниження відбувається за рахунок втрат на опір руху. Тому вираз для критерію запишемо так:

$$E = \int_{t_o}^{T} P_k(t)\,\dot{x}dt \to \min, \tag{6.29}$$

де t_o, T – час початку і завершення циклу.

На міжміських сполученнях відстань з відомими дорожніми умовами W є значно меншою, ніж довжина маршруту автомобіля $L_м$, тому кінцевий час T циклу є невідомим, а інтеграл у виразі (6.29) має рухому праву межу. Маршрут можна поділити на ділянки так, щоб загальна програма руху на магістралі $u(x)$, $x = 0\ldots L_m$, що складається з часткових оптимальних програм $u(x_j)$, $j=x_{j.0}\ldots L_j$, була також оптимальною. У цій задачі потрібно забезпечити такий розклад руху автомобіля, щоб при $x_0(t)=0$, $x_0(T)=L$, де $x=x_0\ldots L_м$ – шлях; T –

граничний час виконання маршруту довжиною $S_м$, прибути в кінцевий пункт з мінімальною витратою енергії. Нові змінні: $x_1(t)= x(t)$, $x_2(t) = \dot{x}(t)$.

Функція мети:

$$E = \int_{t_o}^{T} u(t)\, x_2 dt \to \min, \tag{6.30}$$

а система спряжених рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{x}_2(t) = u(t) - f_o - f_w x_2^2 \\ x_2(t) = \dot{x}_1(t) \end{cases}, \tag{6.31}$$

Потрібно знайти фазову траєкторію $x_2 = F\left(x_1(t)\right)$, а також програму керування $u(t)$ з обмеженнями:

$x_1(t_0) = 0$; $x_2(t_0) = V_0$ – лівий кінець фазової траєкторії є закріплений;

$x_1(T) \geq S$ – випливає з умов дотримання розкладу руху, тобто, якщо на будь-якій ділянці довжиною S граничний час її проходження не витримується, то розклад є недотриманий в цілому;

$x_2(t) \leq V_{\max}$ – обмеження максимальної швидкості з умов безпеки руху;

$u(t) \leq u_{\max}$ – обмеження за потужністю транспортного засобу.

Розв'язок такої локальної задачі можна знайти методами варіаційного числення, зокрема, використовуючи принцип максимуму Понтрягіна при умові, що рівняння системи (6.31) – диференційовані по змінних x_1, x_2, а також, щоб відповідна функція Гамільтона досягала максимуму на інтервалі $[t_0; T]$. Раніше таку задачу було розв'язано для ділянки маршруту, де опір руху є сталим, а кінці фазової траєкторії – закріплені [349, 350]. Принцип максимуму є достатнім при побудові фазової траєкторії, якщо обидва її кінці є закріплені. В цих дослідженнях правий кінець фазової траєкторії – рухомий. Крім того, система рівнянь (6.31) є нелінійною і може не мати стійких розв'язків [352]. В зв'язку з цим було застосовано редукцію початкової задачі (6.30), (6.31) до кінцево-вимірної задачі математичного програмування [158]:

$$\sum_{i=0}^{N-1} u^i \left(t_{i+1} - t_i\right) x_2^i \to \min, \tag{6.32}$$

де i – номер ділянки, на які була поділена S; із системою спряжених рівнянь:

$$\begin{cases} \dfrac{x_2^{i+1} - x_2^i}{t_{i+1} - t_i} = u^i - f_o^i - f_w \left(x_2^i\right)^2 \\ \dfrac{x_2^{i+1} - x_2^i}{t_{i+1} - t_i} = x_2^{i+1} \end{cases}, \tag{6.33}$$

та обмеженнями:

$$x_2^0 = V_o;\ x_1^0 = 0;\ x_2^i \le V_{\max}, i = 0,1,\ldots N;\ u^i \le u_{\max};\ x_1^N \ge S, \tag{6.34}$$

звідки отримуємо:

$$x_2^{i+1} = \left(u^i - f_o^i - f_w \left(x_2^i\right)^2\right)\left(t_{i+1} - t_i\right) + x_2^i, \tag{6.35}$$

$$\text{та} \quad x_1^{i+1} = x_2^{i+1}\left(t_{i+1} - t_i\right) + x_1^i, \tag{6.36}$$

Змінними нової задачі математичного програмування є x_1^i, $i = 1,\ldots N$ та u^i, $i = 0,\ldots N-1$.

Застосувавши комп'ютерні засоби розв'язання задачі математичного нелінійного програмування (пакет *Solver* в електронних таблицях *Excel*), знайдено оптимальний закон керування для таких початкових умов: початкова / мінімальна швидкість циклу V_o – 14 м/с; коефіцієнт відносного опору кочення f_o – 0,0015; коефіцієнт відносного опору повітря f_w– 0,0008; максимальна дозволена швидкість $V_{\max}$=25 м/с (додаток Ж). Оптимальна фазова траєкторія показана на рис. 6.16. Відповідний цій траєкторії закон оптимального за енергоощадністю показано на рис.6.17. Як видно з рис. 6.16, 6.17, на прямолінійній горизонтальній ділянці дороги оптимальне керування – це імпульсний режим, тобто такий, при якому рушійна сила (привід силових агрегатів) автомобіля вмикається лише для досягнення номінального режиму, у даному випадку такого, при якому досягається максимальна дозволена швидкість [295]. Після досягнення цього режиму привід вимикається і швидкість автомобіля знижується до мінімальної – 14 м/с. Зауважимо, що розгін автомобіля

здійснюється при теоретично можливому максимальному значенні відносної рушійної сили u_{max}=5,2 м/с^2.

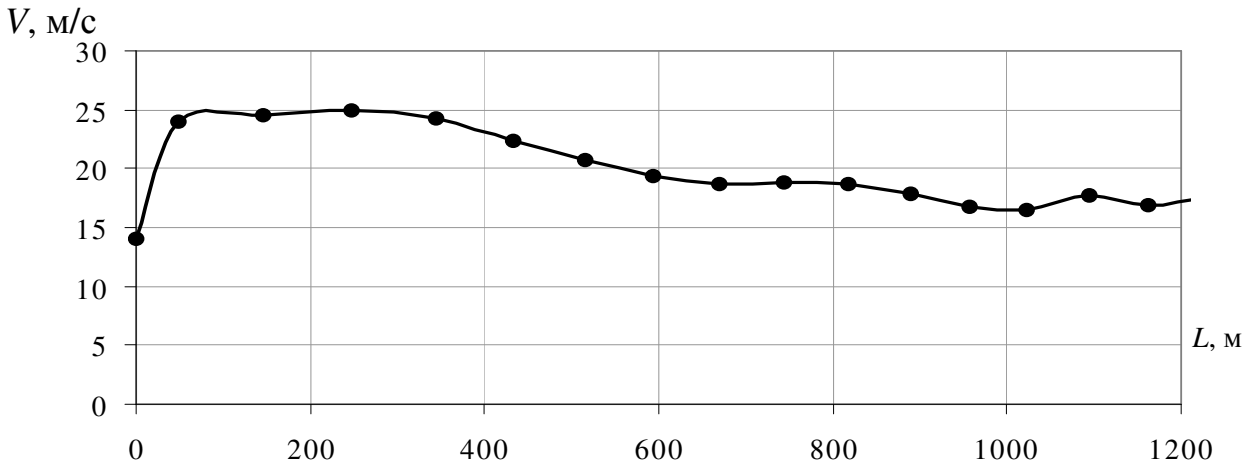


Рисунок 6.16 – Оптимальна фазова траєкторія, отримана при розв'язанні моделі

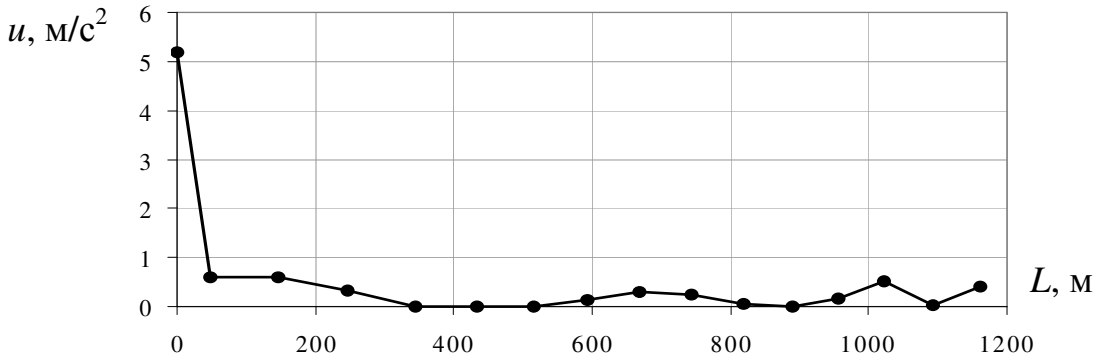


Рисунок 6.17 – Оптимальний закон керування

Співвідношення тривалості розгону до тривалості циклу – 0,08. В реальних умовах таке можна реалізувати лише при певних динамічних характеристиках автомобіля. Ділянка вільного кочення до мінімальної швидкості – 1232 м. Тривалість такого оптимального циклу становить 62 с, тобто середня швидкість об'єкта – 19,87 м/с. Для того, щоб перевірити таке твердження на основі концептуальної моделі (6.30), (6.31), було проведено експерименти. Експериментальні дослідження проводились на заміській дорозі М11 у Львівській області в напрямку Львів-Городок, з сухим рівним покриттям, в хорошому технічному стані. За параметрами вона – 2-го класу. Ділянка її, на якій проводились дослідження, проходить по горизонтальній місцевості, не має перетинів з іншими дорогами, піших переходів, зон з обмеженою види-

містю, мостів, звужень. Дослідження проводились в час найменшої інтенсивності руху (неділя, 8^{00}-9^{00}), яка не досягала 5 автомобілів/год. Видимість шляху була доброю. Дослідження проводились на автопоїзді у складі автомобіля-тягача DAF XF 105, об'єм двигуна 12,9 л, 2018 р. в. із загальним пробігом 70 тис. км. + напівпричіп Cogel Cargo SN 24. Автомобіль і напівпричіп були у справному стані. Автопоїзд був без вантажу. В салоні автомобіля перебували двоє осіб: водій і пасажир. Вимірювання тривалості циклів виконувалось з допомогою електронного секундоміра і контролювалось з допомогою відеореєстратора DOD GSE 550, яким також визначалась миттєва швидкість та пройдений шлях. Параметри роботи двигуна реєструвались в режимі реального часу з допомогою пристрою Сканматік-1, підключеного через діагностичний роз'єм і адаптер DB25 до ПК, і відповідного програмного забезпечення. Записувалась зміна з часом: шляхової витрати палива, миттєвої швидкості автомобіля, частоти обертання к. в. Застосовувались такі режими руху: 1)розгін від початкової швидкості 50 км/год. до, відповідно, 70, 80 та 90 км/год. з мінімальним прискоренням (мінімальна допустима частота обертання к. в. при даній швидкості) на прямій передачі трансмісії; далі – вільне кочення з вимкненою передачею до досягнення початкової швидкості; 2)такі ж цикли розгін – вільне кочення, однак – з максимальним прискоренням (рейка паливного насосу – максимально відкрита); 3) рівномірний рух з середньою швидкістю 75,7 км/год. (21,1 м/с), двигун працює в частковому режимі (рейка паливного насосу відкрита неповністю). Кожен дослід повторено тричі в прямому і зворотному напрямку дороги. Осцилограми, записані приладом Сканматік, подано в додатку Л.

Експерименти проводились при різній максимально досяжній швидкості, однак довжина переміщення автомобіля була сталою – 1200±60 м. Дані записаних файлів осцилограм було оцифровано. Після цього проведено обробку табличних даних з допомогою електронних таблиць Excel, та виконано порівняння отриманих циклів з однорідними за середньою технічною швидкістю на заданій ділянці дороги. В результаті було доведено, що найкраще

практичні результати узгоджуються з моделюванням при умові максимально інтенсивного розгону до найбільшої можливої з максимальних швидкостей (70 км/год. – в даному випадку). Приклад експериментальних даних, при яких досягнуто максимального сподіваного ефекту з економії палива з розгоном 50-90 км/год., подано на рис. 6.18.

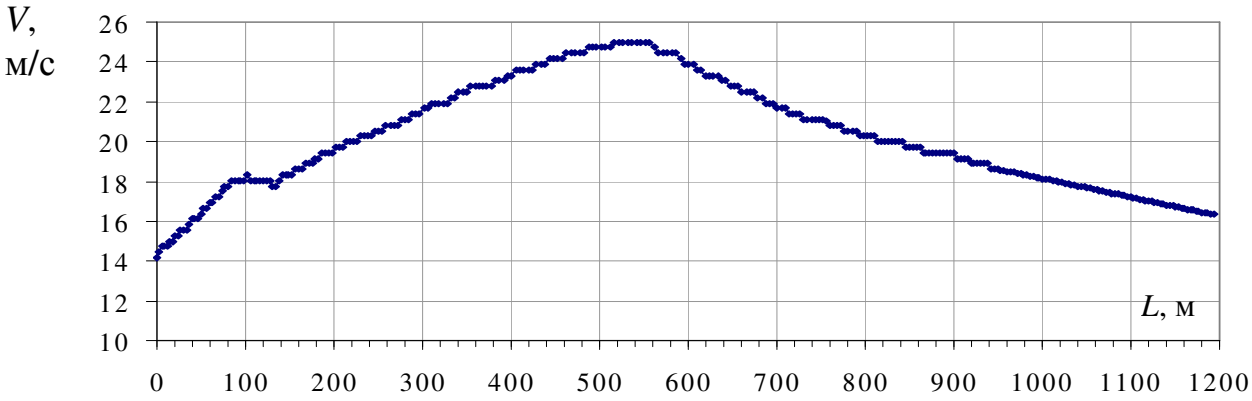


Рисунок 6.18 – Експериментальна залежність швидкості автомобіля при коливному циклічному русі

Шляхова витрата палива, виміряна приладом Сканматік-1 при цьому ж експерименті подана на рис. 6.19. Шляхом інтегрування кривої на рис. 6.19, та інших залежностей встановлено такі результати експериментів (табл. 6.2).

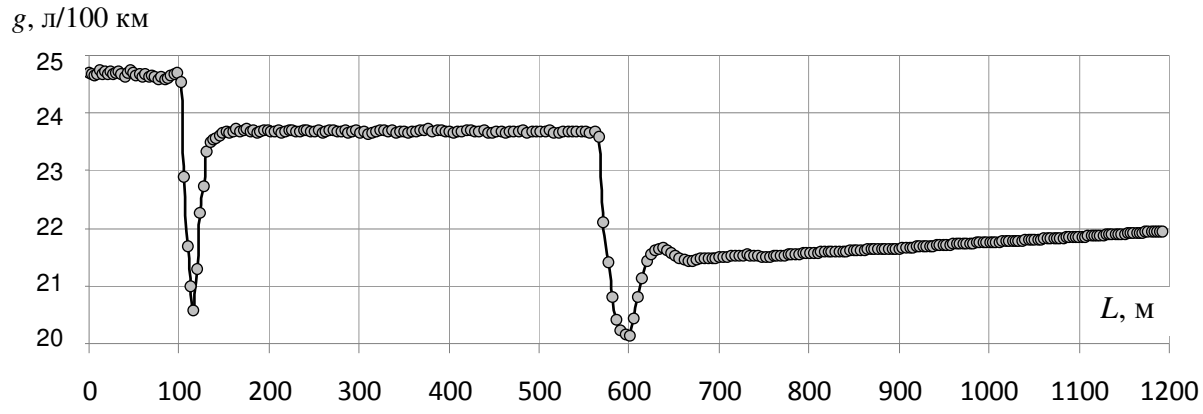


Рисунок 6.19 – Шляхова витрата палива при коливному циклічному русі

Як видно з таблиці, експерименти № 1, 2, 3 показують, що циклічний коливний рух автомобіля є ощаднішим, за витратою палива, ніж режим сталого руху, проте він поступається середньою швидкістю руху. Найбільша економія спостерігається в тих коливних режимах, де максимальна швидкість не значно перевищує швидкість вільного кочення. Однак, порівнюючи пока-

зник співвідношення тривалість розгону / тривалість циклу, можна побачити, що для найощаднішого режиму №3 він є найбільшим. Це означає, що велика інтенсивність розгону є негативним фактором у енергоощадності автомобіля, якщо брати до уваги відомі з практики факти [241-243, 353, 354].

Таблиця 6.2 – Зведені експериментальні дані про цикли руху автомобіля

№ експерименту	Максимальна швидкість циклу, км/год.	Мінімальна швидкість циклу, км/год.	Пробіг за цикл, м	Тривалість циклу, с	Середня швидкість циклу, км/год.	Співвідношення тривалість розгону /тривалість циклу	Сумарна витрата палива, л
1	90	50	1193,3	59,8	71,7	0,31	0,2616
2	80	50	1210,0	65	60,6	0,37	0,2600
3	70	50	1109	56	71,0	0,42	0,2693
4	76	75,5	1183	56,2	75,75	0,0	0,2740

Також було застосовано редукцію початкової задачі (6.30), (6.31) до деякої кінцево-вимірної задачі математичного програмування. Якщо розглянути припущення, що керування рухом автопоїзда здійснюється не безперервно, а в деякі моменти часу $t_o < t_1 < \ldots < t_{N-1} < t_N = T$, то можна початкову задачу замінити кінцево-різницевим аналогом:

$$\sum_{i=0}^{N-1} \left(u^i \pm f_x^i\right)\left(t_{i+1} - t_i\right) x_2^i \to \min, \tag{6.37}$$

де i – номер ділянки, на які була поділена L; із системою спряжених рівнянь:

$$\begin{cases} \dfrac{x_2^{i+1} - x_2^i}{t_{i+1} - t_i} = u^i - f_o^i \pm f_x^i x_1^i - f_v x_2^i - f_w \left(x_2^i\right)^2 \\ \dfrac{x_2^{i+1} - x_2^i}{t_{i+1} - t_i} = x_2^{i+1} \end{cases}, \tag{6.38}$$

та обмеженнями:

$$x_2^0 = V_o;\ x_1^0 = 0;\ x_2^i \le V_{\max}, i = 0,1,\ldots N;\ u^i \le u_{\max};\ x_1^N \ge L, \tag{6.39}$$

звідки отримуємо:

$$x_2^{i+1} = \left(u^i - f_o^i \pm f_x^i x_1^i - f_v x_2^i - f_w \left(x_2^i\right)^2\right)\left(t_{i+1} - t_i\right) + x_2^i, \tag{6.40}$$

$$\text{та} \quad x_1^{i+1} = x_2^{i+1}\left(t_{i+1} - t_i\right) + x_1^i, \tag{6.41}$$

Змінними нової задачі математичного програмування є x_1^i, $i=1,\dots N$ та u^i, $i=0,\dots N-1$. Кількість їх, та ефективність розв'язку суттєво залежить від довжини ділянки *L*, яка має різноманітний поздовжній профіль. Було проаналізовано чимало їх варіантів, однак з'ясовано, що будь-який вид профілю може містити у собі 9 типових елементів, які є взаємозалежними (рис.6.20). Сучасні вимоги до конструкції автомагістралей є такими, що допуск встановлено на максимальне допустиме значення схилу, радіусу випуклих (IV, VI) та опуклих (II, VIII) елементів довжину перехідних частин профілю тощо [351]. Профілі можуть бути такими, що не матимуть горизонтальних (I, V, IX), похилих (III, VII), чи деяких перехідних ділянок, а довжина їх може бути довільною [351].

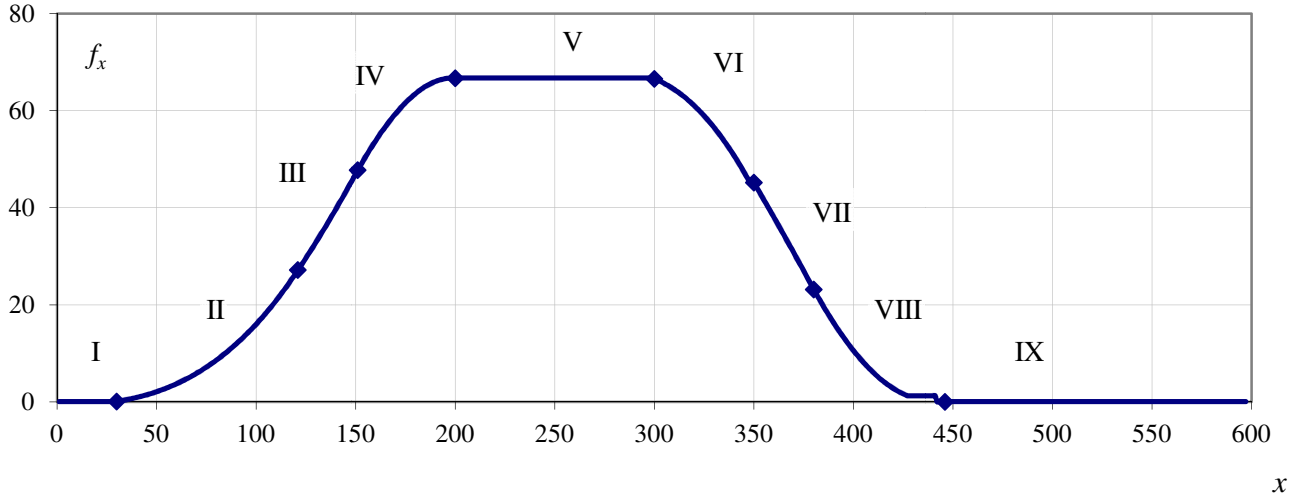


Рисунок 6.20 – Схема поздовжнього профілю типової ділянки магістралі: I-IX - типові елементарні складники ділянки

Однак, усі елементи профілю є такими, що можуть бути достатньо точно описані аналітичними залежностями:

$$f_x^j = f_j \pm \frac{x^{j-1} - x^j}{R^j}, \qquad (6.42)$$

де f_j – сталий відносний опір рухові; j=I, II, … IX; R^j – радіус перехідної ділянки; знак в правій частині формули залежить від виду кривої: "+", якщо вона опукла, "-" – увігнута; $x^{j-1}-x^j = l_j$– довжина горизонтальної складової пройденого шляху. Таким чином, задавши параметри s_j, R_j та f_j, можна з достатньою точністю отримати аналітичний вираз для будь-якого профілю магістралі у

вигляді функції $f_x(x)$. Задача математичного програмування (6.29) - (6.30) є нелінійною, якщо взяти до уваги змінний профіль дороги. Тому для неї потрібно було застосовувати градієнтний метод, зміст якого полягав в тому, що напрям пошуку був скерований в напрямку збільшення довжини пройденої дистанції за t_N інтервалів часу. Приклад однієї з фазових траєкторій, що відповідає поздовжньому профілю на рис. 6.20, показано на рис. 6.21.

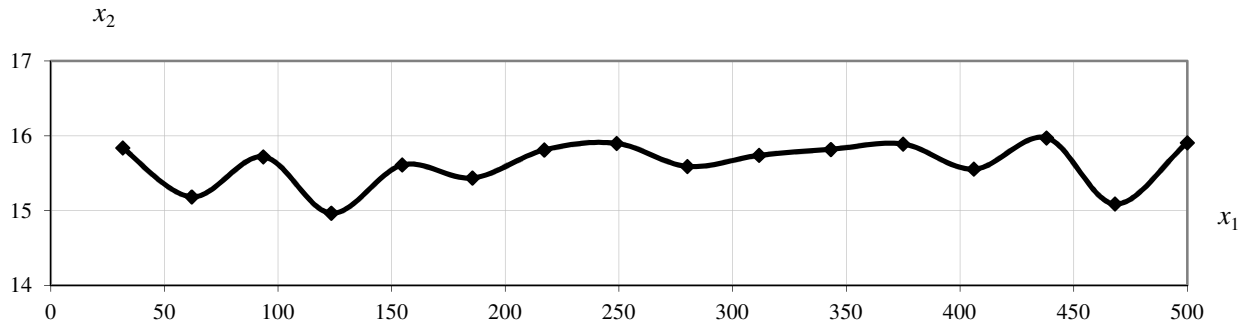


Рисунок 6.21 – Оптимальна фазова траєкторія магістральної дороги

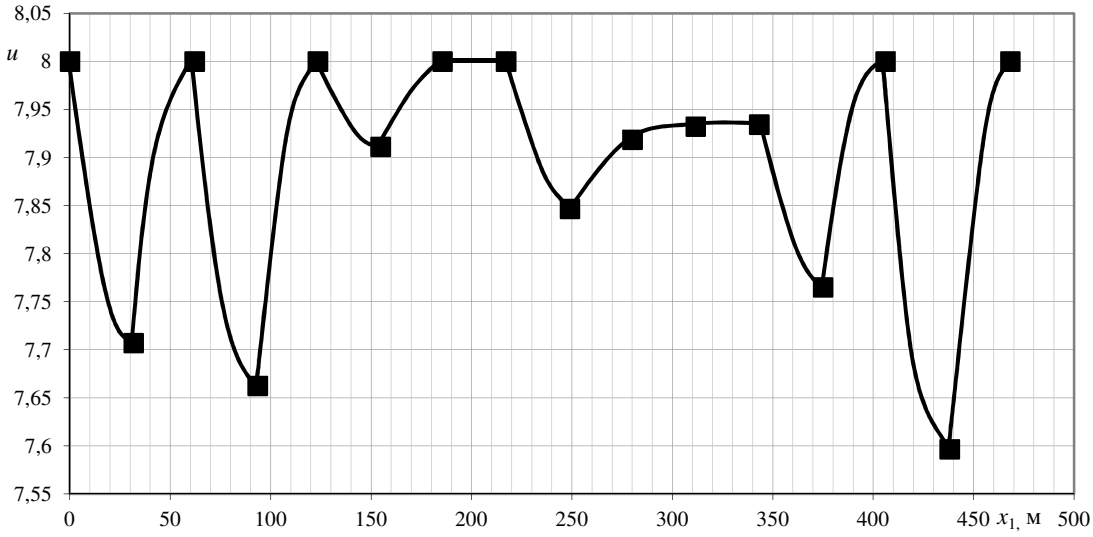


Рисунок 6.22 – Зміна відносного значення рушійної сили при оптимальному керуванні автомобілем

В даному прикладі довжина шляху, на якому здійснювалось керування – 500 м. Цю віддаль автомобіль повинен був би подолати не більш, як за 32 с. На максимальну швидкість автомобіля не накладено обмежень, однак вони стосуються максимально допустимого відносного значення рушійної сили. Оптимальне керування автомобілем (зміна рушійної сили на провідних колесах) є дискретно монотонною функцією (рис. 6.22) з розривами першого роду. Як видно з рис. 6.19-6.22, оптимальне керування автомобілем відбувається-

ся в імпульсному режимі (розгін-вільне кочення) на горизонтальних ділянках магістралі та на під'їзді до підйому. Швидкість руху автомобіля коливається тут в межах 15,9…16 м/с (див. рис. 6.20). На пагорбі автомобіль рухатиметься за імпульсним циклом з обмеженням: розгін-рух з постійною швидкістю-вільне кочення. Тут швидкість його не зазнає значних коливань, адже відбувається нагромадження кінетичної енергії, яка витрачається на спуску. Далі, на горизонтальній ділянці автомобіль знову має рухатись в імпульсному режимі без обмеження. Середня технічна швидкість такого циклу – 15,6 м/с. Сумарні енерговитрати на одиницю повної маси автомобіля – 1,025 кВт·год./кг.

Якщо на параметр керування накладати більші обмеження, (дослідження виконано при змінному значенні u_{max}=6…10), то це призводить до відсутності імпульсних режимів керування, зниження середньої швидкості такого ж циклу і зростання сумарних енерговитрат (рис. 6.22). При збільшенні ж допустимих значень параметра керування $u(t)$ мінімальні його значення досягають нуля, тобто в транспортному циклі з'являється вільне кочення з марним ходом двигуна. Розроблена модель керування АТЗ дає змогу оптимізувати енерговитрати при русі по магістралі. При цьому застосовується імпульсний транспортний цикл, використовується доступна інформація про дорожні умови. Модель відрізняється тим, що дає гарантований наближений розв'язок задачі оптимального керування, не зважаючи на значні варіативність умов руху та необхідний обсяг інформації. При цьому усувається проблема відсутності стійких розв'язків нелінійних рівнянь руху.

Методика побудови моделі оптимізації стосується магістралей довільної довжини та поздовжнього профілю. Також не залежить вона від типу рухомого складу і категорії доріг. Використовуючи принцип оптимальності у динамічних системах, цією методикою можна скористатись навіть якщо достатньо точно невідомі умови руху для автомобіля вздовж усього маршруту.

6.5 Висновки за розділом 6

1. Використання методу активного спостерігача в задачі керування руху по магістралі дало змогу врахувати прискорення/сповільнення АТЗ, детально змоделювати достатньо велику дистанцію магістралі без залучення розподі-

лених засобів, а також позбутись несуттєвих маневрів на магістралі, які відбирають додаткові обчислювальні ресурси автомата.

2. Результати ІМ показують вагомий вплив зміни швидкостей АТЗ на швидкість інших суб'єктів потоку. Вид залежності – квадратичний. Частина залежності відповідає від'ємним значенням арґумента. Це означає, що навіть при зниженні бажаної швидкості АС над середньою швидкістю потоку відбувається вплив «повільних» автомобілів на АС.

3. В ІТС прогнозування швидкості руху АТЗ можна здійснювати за відносною швидкістю усіх АТЗ, які перебувають в його інформаційному полі.

4. В результаті побудови теоретичної моделі оптимальної за енергоощадністю програми руху автомобіля по горизонтальній прямолінійній дорозі, при умові дотримання графіка руху, а також після верифікації моделі за низкою проведених експериментів встановлено, що цикл руху "розгін - вільне кочення" є більш ощадним, ніж рівномірний рух.

5. Розв'язки задач складання розкладів мають вищий якісний рівень, якщо їх отримувати комплексно з маршрутизацією і розподілом автомобілів по відомих замовленнях. Це досягається за рахунок інтегративного ефекту і отримання більшої кількості альтернативних рішень.

6. У запропонованій методиці прогнозування умов руху і режимів швидкості АТЗ і алгоритмі контролю горизонт прогнозування є одним з ключових факторів, які впливають на якість керування на МТМ.

7. Методика вибору швидкості АТЗ в умовах змінних дорожніх і транспортних умов враховує вплив на прийняті рішення кількості й обсягу інформаційних повідомлень. В методиці застосовано вибір потенціально ефективних рішень на основі евристичного алгоритму.

8. Використання ІМ дало змогу виявити кусково-монотонний характер залежності показників якості керування траєкторією швидкості транспортного засобу від горизонту прогнозування. Виявлено параметричний ряд оптимальних значень кількості отриманих повідомлень. Також виявлено, що на вибір оптимального обсягу інформації, яку отримує водій транспортного за-

собу впливає середнє значення і дисперсія обмежень швидкості на магістралі.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [1, 1, 3, 5, 61, 9, 16, 39, 18, 20, 24, 26, 31, 41, 42, 43, 45, 47].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішується актуальна науково-практична проблема надмірного резервування провізної здатності транспортних засобів при доставці вантажів у магістральних транспортних мережах. Наукові основи організації транспортних процесів без часових затримок враховують квазіперіодичних характер виконання замовлень, ознаки сумісності логістичних операцій, вплив змінних зовнішніх умов та інтенсивності матеріальних потоків. Результати дисертаційних досліджень дозволили сформулювати теоретичні та науково-практичні висновки, основними з яких є такі.

1. З результатів аналізу стану міжміських і міжнародних вантажних автомобільних перевезень можна стверджувати, що затримки доставки вантажів, простої автотранспортних засобів, та інші непродуктивні витрати часу на МТМ, зростають зі збільшенням вантажообігу. Головні причини цієї проблеми: під час виконання ТП не враховується дискретний, періодичний характер МП, а також те, що відсутні взаємодія суб'єктів ТП, відповідна реакція на збурення, та її циклічне повторення.

2. На основі структурного аналізу систематизації властивостей типових схем доставки вантажів, було встановлено, що довільний транспортно-логістичний процес подати у вигляді системи взаємопов'язаних елементарних логістичних операцій. Якщо процес доставки є циклічним, то детермінований зв'язок існує між вхідними і вихідними параметрами його логістичних ланцюгів. Завдяки оптимізації циклічних ТП на МТМ було запропоновано «гнучкі» моделі, впровадження яких дає змогу знизити сукупні затримки доставки вантажів максимум від 2,2 до 5 разів, в діапазоні інтенсивності сумарного вантажопотоку 5…15 транспортних пакетів/год. При цьому запропоновані ТТС характеризуються майже сталою гарантованою тривалістю доставки (не перевищує 129 год. при віддалі перевезення до 1000 км). Кожна оптимальна ТТС може використовуватись на обмеженому діапазоні інтенсивності вантажопотоку, де вона має локальний оптимум.

3. Адаптація ТП до зміни інтенсивності вхідного МП зумовлює збіль-

шення затримок, при відсутності узгодження з інформаційними потоками, які супроводжують ці зміни. Сукупні затримки МП лінійно залежать від зміни його інтенсивності, якщо ТТС не має розгалуження. Це можна нівелювати, якщо застосувати відповідні структурні моделі ТП, які дають змогу узгодити ЕЛО в адаптованому ТП. Для тих ТП, де операції транспортування в ЛЛ є тривалішими, збільшення МП приводить до зменшення додаткових витрат часу. У ЛЛ, де є багато складів, при зростанні інтенсивності МП збільшуються затримки. Для стабілізації ТП з мінімальними втратами часу і коштів доцільно виконувати перерозподіл потоків між напрямками і джерелами на основі мультиаґентної моделі прийняття рішень. При цьому кожним аґентом приймається рішення про зміну розміру гурту вантажів і видовження лінійних ЛЛ.

4. Відобразивши ТП у вигляді мультиаґентної багаторівневої моделі з детермінованими залежностями організаційних параметрів ЕЛО, які утворюють ЛЛ виконання множини замовлень з доставки вантажів, розроблено методику побудови гарантованого оптимального розкладу упорядкованої роботи АТЗ, за критерієм мінімальних сумарних затримок доставки вантажів, при умові максимальної продуктивності АТЗ на МТМ. Підвищення інтенсивності використання АТЗ на МТМ приводить до збільшення простоїв їх в транспортних пунктах. Побудова розкладу АТЗ є нелінійною оптимізаційною задачею. Для розв’язання її необхідно сформулювати крайові умови щодо максимальної чисельності парку АТЗ, та функцій розподільчих вузлів МТМ. З’ясовано, що не усі оптимальні за складом автомобіле-потоки можуть забезпечити заданий попит на перевезення. Цей недолік зменшується при зростанні кількості паралельних автомобілепотоків, які взаємодіють.

5. Оптимальні рішення про реакцію на зовнішні збурення, враховуючи циклічний характер ТП магістральних перевезень, велику просторову розосередженість транспортних пунктів, мають бути не тільки централізованими, а й прийматись внаслідок обміну інформацією аґентів. Інформаційний потік в МТМ являється суперпозицією часткових потоків. Тому розроблена методо-

логія побудови циклічного розкладу для групи АТЗ, на основі мультиагентного підходу дає гарантований розв'язок достатньої точності за прийнятний час для малих і великих масивів даних, які періодично поновлюються.

6. Запропоновано концепцію організації руху АТЗ на магістральних дорогах, згідно із якою прогнозування швидкості його руху можна здійснювати за відносною швидкістю усіх тих АТЗ, які перебувають в його інформаційному полі. В результаті побудови оптимальної за швидкодією програми руху автомобіля по магістралі, при умові відсутності примусового сповільнення, а також після верифікації моделі за низкою проведених експериментів встановлено, що цикл руху «розгін - вільне кочення» є більш придатним для такої програми, ніж рівномірний рух. Використати запропоновану модель оптимального керування АТЗ можна, побудувавши низку типових транспортних циклів, які відрізняються середньою швидкістю, довжиною, структурою, але характеризуються мінімальними витратами енергії руху без застосування нераціональних режимів.

6.1. Будь-який за складністю, планом траси та іншими мінливими умовами маршрут можна розглядати як сукупність елементарних оптимальних циклів, які можна оптимально скомбінувати. У цьому випадку розроблені розклади мають вищий якісний рівень, ніж ті, що складені за одноразовим планом. Для виконання системи руху міжміських вантажних перевезень «не пізніше визначеного терміну» з дотриманням оптимальних швидкостей, необхідно обґрунтовано вибирати спосіб, кількість джерел та моменти отримання повідомлень про дорожні, транспортні та організаційні умови виконання транспортних завдань АТЗ. Використання декількох незалежних інформаційних потоків зменшує відхилення від оптимальної програми руху, однак скорочує час на прийняття ефективних рішень.

6.2. Використання комбінованого методу активного спостерігача та клітковых автоматів в ІМ магістрального транспортного потоку дає змогу сприймати досить великі обсяги вхідних даних, оскільки відображає динаміку ситуації довкола заданого інформаційного поля. Розроблена методика ІМ

враховує усі прискорення / сповільнення АТЗ, детально відображає достатньо велику ділянку магістралі без залучення розподілених засобів. Усі маневри АТЗ здійснюються за принципом об'єктивної доцільності. Це відповідає концепції створення ІТС на МТМ.

7. Розроблено практичні методи організації роботи парку АТЗ, зокрема метод прогнозування показників процесу обслуговування вхідних потоків замовлень, який, при застосуванні певної стратегії організації транспортних процесів на МТМ, та програми «Simulation-3», дає змогу знизити кількість відмов у виконанні замовлень, в середньому на 30..40% по АТП – до 35% від загального потоку заявок; тривалість виконання замовлень на міжміських маршрутах скорочується на 12…20%; метод оптимізації розкладів автопоїздів та метод оптимізації роботи та відпочинку водіїв з врахуванням параметрів маршрутів, покращують систему диспетчерського керування парком магістральних АТЗ з використанням розроблених пакетів комп'ютерних програм «Schedule-14» і «Schedule-20». Непродуктивні витрати часу автопоїздів на міжміських маршрутах скорочуються, в середньому, на 20…25% від загальної тривалості транспортних циклів. Тривалість доставки вантажів скорочується на 15…20%. Позитивний техніко-економічний ефект від впровадження практичних методів досягається від зниження непродуктивних простоїв АТЗ не менш, як на 20%, зменшення штрафних санкцій через порушення термінів доставки, а також раціональним використанням робочого часу водіїв. Усі подані результати підтверджено відповідними актами впровадження (додаток М).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Оліскевич М. Передумови створення інтелектуальних систем оперативного керування автотранспортом при доставці вантажів у міжміському сполученні. *Бізнес-моделі розвитку транспортних, агропромислових і інших підприємницьких структур: сучасні реалії та перспективи:* Колективна монографія з міжнародною участю / за ред. Л. М. Савчук, Л. М. Бандоріної. Дніпро: Пороги, 2018. 416 с. (параграф 4.5, С. 200-209).
2. Oliskevytch M. Modelling of complex highway automated control system as tool for reducing fuel consumption and emission in heavy-duty trucks. *Energetic and ecological aspects of agricultural production*. Chapter 5. Warsaw Un. of Life Sciences. Warsaw, 2010. P. 48-58.
3. Stotsko Z., Oliskevych M. Vehicle driving cycle optimisation on the highway. *Transport Problems*: an International Scientific Journal, 2016. Vol. 11 (2), Issue 2. P. 123-133.
4. Oliskevych M. Optimization of periodic unitary online schedule of transport tasks of highway road trains. *Transport Problems*, 2018. Vol. 13 Issue 1. P. 111-122.
5. Prokudin G., Oliskevych M., Chupaylenko O., Dudnik O. Development of vehicle speed forecasting method for intelligent highway transport system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 2019. № 4/3 (100). P. 6-14.
6. Sharai S., Oliskevych M., Roi M. Development of the procedure for simulation modeling of interrelated transport processes on the main road network. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5/3 (101). 2019. P.70-83.
7. Прокудін Г. Шарай С., Оліскевич М., Рой М. Моделювання взаємодії автомобільних транспортних підприємств на міжміських перевезеннях вантажів. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2019. 10 (2). С. 95-101. URL: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2019-10-2-95-101

8. Oliskevych M., Kovalyshyn S., Magats M., Shevchuk V., Sukach O. The optimization of trucks fleet schedule in view of their interaction and restrictions of the european agreement of work of crews. *Transport Problems,* 2020. Vol. 15 Issue 2. P. 157-170. (*Scopus*)
9. Oliskevych M., Pelo R., Prokudina I., Silenko V., Sorokivskyi O., Zaiats O. Optimization of vehicle speed forecasting horizont on the intercity highway. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. 3/3 (105). P.57-68. (*Scopus*)
10. Вільковський Є.К., Оліскевич М. С., Дорош В. М. Методика визначення необхідної кількості автотранспортних засобів на маятникових маршрутах. *Вісник НТУ*, 2006. №13. Ч.2. С.68-72.
11. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Дискретне моделювання матеріальних потоків в логістичних схемах доставки вантажів, які швидко псуються. *Вісник НТУ,* 2006. №200. С. 72-78.
12. Оліскевич М. С. Вплив завантаженості автопотяга на питомі витрати палива. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. №6 (112). Луганськ, 2007. С. 169-173.
13. Доля В. К., Оліскевич М. С. Оптимізація параметрів інформаційних потоків при виборі режимів руху автотранспортних засобів на вантажних магістральних перевезеннях. *Коммунальное хозяйство городов*. Серія: технічні науки та архітектура. Харків. Техніка, 2007. Вип. 79. С. 305-313.
14. Оліскевич М. С. Класифікація логістичних операцій в транспортно-технологічних схемах. *Вісник НТУ*. ч. 2. КНТУ, 2007. Вип. 15. С. 144-148.
15. Оліскевич М. С. Імітаційне моделювання вибору програми руху автотранспортних засобів на магістральних перевезеннях. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка*. Харків, 2008. Вип. 75. том 2. С. 122-130.
16. Оліскевич М. С. Залежність швидкості і прискорення автомобіля в транспортному магістральному потоці від характеристик інформаційного поля. *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту*, 2008. №2(6). С.132-137.

17. Оліскевич М. С. Концепція архітектури інформаційної системи магістральної транспортної мережі. *Вісник ЖДТУ*. Технічні науки, 2008. №3 (46). Том 2. С. 98-106.

18. Форнальчик Є. Ю., Оліскевич М. С. Концепція автоматизованої системи керування магістральними автотранспортними потоками. *Вісник НТУ*. Київ, 2009. №18. С. 60-69.

19. Оліскевич М. С. Оптимізація інтервалів дискретизації навігаційної інформації при дотриманні найбільш ощадних програм руху автомобілів в логістичних системах. *Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів і поїздів*. Київ, 2009. №17. С. 304-310.

20. Оліскевич М. С. Механізм ситуаційного керування автомобілем в магістральному транспортному циклі. *Вісник Східноукраїнського Національного університету* ім. В. Даля. Луганськ, 2010. №6(148). с. 89-93.

21. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Умови ефективного застосування магістральних програм імпульсного руху вантажних автомобілів. *Проектування, виробництво, експлуатація автотранспортних засобів та автопоїздів*. Львів. НКЦ НТУ, 2010. №18. С. 172-178.

22. Оліскевич М. С. Дискретно-подійне моделювання магістральних транспортно-технологічних систем автомобільного транспорту. *Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля.* Луганськ, 2011. №5(159). С. 242-248.

23. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Оптимізація логістичних витрат у транспортно-технологічній системі доставки продуктів харчування. *Вісник Львівського Національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження.* Львів. нац. агроуніверситет, 2011. № 15. С. 32-39.

24. Оліскевич М. С. Алгоритм інформаційного забезпечення вільного руху автомобіля на магістралі за енергоощадною програмою. *Вісник СевНТУ,* 2012. Вип. 135. С. 142-145.

25. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Імітаційне моделювання логістичних центрів в системі збуту продукції, яка швидко псується. *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля,* 2012. № 6 (177). Ч. 1. С. 98-103.
26. Оліскевич М. С. Оптимізація транспортних циклів залежно від обсягу прогнозованих вантажопотоків. *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля,* 2013. № 5 (194). Ч. 1. С. 140-145.
27. Оліскевич М. С. Обґрунтування періоду формування оптимальних планів перевезення вантажів на заданій транспортній мережі. *Вісник СевНТУ,* 2013. Вип. 142. С. 162-165.
28. Оліскевич М. С. Оптимізація структури автомобілепотоків для обслуговування заданого пункту відправлення вантажів. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2014. Вип № 45. С. 386-395.
29. Оліскевич М. С. Дослідження структури та параметрів транспортно-технологічної системи матеріального постачання за умов прогнозованої зміни попиту на продукцію. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, 2015. №1 (218). С. 226-229.
30. Оліскевич М. С. Стабілізація матеріальних потоків в транспортно-технологічних системах доставки вантажів. *Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля,* 2016. № 1 (225). С. 150-154.
31. Оліскевич М. С. Дослідження циклічних режимів роботи автомобіля на прямолінійній горизонтальній непересіченій ділянці дороги. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2016. Вип № 55. С. 261-268.
32. Оліскевич М. С. Методика оцінювання стабільності транспортно-технологічних схем за умов змінних матеріальних потоків. *Вісник Житомирського держ. технологічного ун-ту*, 2016. №2(77). С. 193-200.
33. Прокудін Г. С., Оліскевич М. С. Методика оптимізації спільного розкладу парку магістральних автомобілів при наявності часових обмежень. *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*, 2018. №2 (82). С. 118-126.

34. Прокудін Г. С., Оліскевич М. С. Вплив структури транспортної системи на показники якості доставки вантажів у міжміському сполученні. *Вісник Національного транспортного університету*. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник, 2019. Випуск 1 (43). С. 143-158.

35. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Визначення необхідної кількості автотранспортних засобів в логістичній схемі збуту готової продукції. *Маркетинг та логістика в системі менеджменту*: тези доп. VI міжнар. наук.-практ. конф. (Львів. 9-10 лист. 2006) НУ „Львівська політехніка". Львів, 2006. С. 134.

36. Oliskevych M. Providing with optimal information amount the choice of hauling and speed modes of lorry on main transportations. *Problemy recyklingu*. Warszawa, 2007. P. 183-190.

37. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Визначення необхідної кількості автотранспортних засобів у логістичній схемі збуту готової продукції. *Вісник Нац. ун-ту "Львів. політехніка". Логістика*, 2007. № 580. С. 307-313.

38. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Залежність витрат енергії від динаміки виробничого процесу постачання замороженого м'яса. *Вісник Львівського Національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження*. Львів. нац. агроуніверситет, 2008. № 12. С. 64-75.

39. Oliskevycz M. Wpływ czynników organizacyjnych na toksyczność spalin emitowanych przez samochody ciężarowe w cyklu przewozowym w obrębie miasta. *Problemy recyklingu*. Warszawa, 2008. S. 83-87.

40. Оліскевич М., Козлинський М. Комплексна динамічна автоматизована система керування магістральними транспортними потоками. *Дев'ятий міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львов*і: тези доповідей. (Львів. 18-19 травня. 2009). Львів, 2009. С. 273-275.

41. Оліскевич М. С. Визначення параметрів розподілу бажаних швидкостей транспортних засобів у магістральному транспортному потоці: *65 наукова конференція науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та*

структурних підрозділів університету: тези доп. (Київ. 14-18 травн. 2009) НТУ. Київ, 2009. С. 417-418.

42. Оліскевич М. С. Дослідження умов ефективності імпульсного руху магістральних автопоїздів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільної галузі*: тези доп. Всеукраїнська наук.-практ. конф. молодих учених та студентів. (Донецьк. 23-26 жовтн. 2011). Донецьк, 2011. С. 64.
43. Оліскевич М. С. Моделювання системи керування магістральними автомобілями як засобу рекуперації енергії за змінних дорожніх умов. *Десятий міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові*: тези доп. (Львів. 14-18 травн. 2011). Львів, 2011. С. 323-325.
44. Оліскевич М. С. Моделювання дискретних матеріалопотоків вантажних транспортних терміналів. *Проблеми підготовки професійних кадрів з логістики в умовах глобального конкурентного середовища*: матеріали 10-ї міжнар. наук.-практ. конф. (Київ. НАУ, 18-19 жовтня 2012). Київ, 2012. С. 38-43.
45. Олискевич М. С., Дорош В. М. Оптимизация совместного расписания автомобилей и погрузчиков. *Современные фундаментальные и прикладные исследования*. УЦ «МАГИСТР». Кисловодск, 2013. №4(11) С. 55-60.
46. Оліскевич М. С. Устаткування для дослідження циклічних режимів роботи силових агрегатів автомобіля. *Одинадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові*: тези доп. (Львів. 23-28 квітн. 2013). Львів, 2013. С. 121-122.
47. Оліскевич М. С. Дослідження умов ефективності імпульсного руху магістральних автопоїздів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільної галузі*: тези доп. II Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених та студ. (Донецьк. 14-18 лист. 2013). Донецьк, 2013. С. 103-105.
48. Оліскевич М. С. Оптимізація транспортно-технологічних систем регіональної магістральної транспортної мережі. *Проблеми підготовки професійних кадрів з логістики в умовах глобального конкурентного середовища*:

матеріали 11-ї міжнар. наук.-практ. конф. (Київ. НАУ, 25-26 жовтня 2013). Київ, 2013. С. 44-48.

49. Оліскевич М.С. Методика оптимізації транспортних циклів. *Проблеми розвитку транспортних систем і логістики*: тези доп. IV Міжнародної науково-практичної конференції. (Євпаторія. 14-16 травня 2013). Євпаторія, 2013. С.89-90.
50. Оліскевич М. С. Моделювання та оптимізація інформаційних потоків в логістичному ланцюзі постачання. *Міські регіональні транспортні проблеми:* тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. (Харків. 17-19 листоп. 2015). Харків, 2015. С. 55.
51. Оліскевич М. С. Теоретичне обґрунтування структури транспортного циклу магістрального автопоїзда. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: тези доп. VIII міжнар. наук.-практ. конф. (Вінниця. ВНТУ. 19-21 жовтня 2015). Вінниця, 2015. С. 169-171.
52. Оліскевич М. С. Обґрунтування оснащення експериментального автомобіля-тягача при побудові емпіричної моделі оптимального керування. *Дванадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові*: тези доп. (Львів. 22-26 квітн. 2015). Львів, 2015. С. 139.
53. Оліскевич М. С. Оптимізація розкладу роботи міських автобусів із застосуванням дискретно-подійного моделювання. *Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конференції. (Львів. 24-25 вересня 2015). Львів, 2015. С. 78-79.
54. Оліскевич М. С. Моделювання інформаційних потоків у транспортно-технологічній системі постачання вантажів. *Логістичне управління та безпека руху на транспорті* : тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф. студ. та молодих вчених. (Харків. 18-20 лист. 2015). Харків, 2015. С. 88-90.
55. Oliskevych M. Optimization of information flows of logistic supply chain. *Econtechmod*. An International Quarterly Journal, 2015. Vol. 4, No. 4. P. 71-76.

56. Оліскевич М. С. Стабілізація матеріальних потоків в транспортно-технологічних системах доставки вантажів. *Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи*: тези доп. міжнар. наук-практ. конф. (Трускавець. 11-17 квітня 2016). Сєвєродонецьк, 2016. С. 133-134.

57. Оліскевич М. С. Алгоритм оптимізації циклів міжміських вантажних перевезень. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка», Динаміка, міцність та проектування машин і приладів,* 2017. № 866. С. 206-210.

58. Оліскевич М. Оптимізація транспортних циклів міжміських вантажних перевезень. *Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання*: тези доповідей. наук.-практ. конф. Нац. ун-т «Львівська політехніка». (Львів. 16-18 березня 2017). Львів, С. 12-13.

59. Oliskevych M. Optimization of load scheme of heavy vehicle for a given flow of goods. *Econtechmod. An International quarterly journal,* 2017. Vol. 06. No. 1. P. 55-62.

60. Oliskevych M. Dynamic scheduling of highway cargo transportation ICCPT 2019 Proceedings of 1st International Scientific Conference «*Current Problems of Transport 2019*» May, 2019. Ternopil, Ukraine. P. 141-151.

61. Lebid I., Shevchenko D., Kravchenya I., Luzhanska N., Prokudin G., Oliskevych M. Rationing of the number of signals and interlockings in the operational stock of railway stations. *MATEC Web of Conferences*, 03036 (2019) EOT-2019. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/2019???03036

62. Свідоцтво серія № 94207 "SCHEDULE-20" – програма побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі. Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М. Дата реєстрації 26.11.2019.

63. Свідоцтво серія № 94208. Комп'ютерна програма "Imitation16" – програма, яка виконує імітацію міжміських автомобільних перевезень вантажів

при випадковому вхідному потоку замовлень. Прокудін Г. С., Оліскевич М. С., Шарай С. М., Рой М. П. Дата реєстрації 26.11.2019.

64. Свідоцтво серія № 94209 Комп'ютерна програма "Simulation 3"– програма імітаційного моделювання транспортного потоку на автостраді. Оліскевич М. С., Шарай С. М. Дата реєстрації 26.11.2019.
65. Свідоцтво серія № 94018. Науковий твір «Імітаційне моделювання транспортних процесів на магістральній мережі» Шарай С. М., Оліскевич М. С., Рой М. П. Дата реєстрації 19.11. 2019.
66. Свідоцтво серія № 89420. Науковий твір «Алгоритм комп'ютерної програми побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі» ("Schedule-14"). Прокудін Г. С., Оліскевич М.С., Чупайленко О. А. Дата реєстрації 05.06.2019.
67. Eurostat Data for short-term economic analysis. 2019 edition. 12/2019. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/ (дата звернення: 19.03.2020).
68. Road freight transport statistics. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road_freight_transport_statistics#Growth_in_EU_road_freight_transport_for_the_fifth_consecutive_year (дата звернення: 01.03.2020).
69. Розвиток транспорту з метою відновлення і зростання української економіки : наукова доповідь / за ред. О.І. Никифорук; НАН України, ДУ Ін-т екон. та прогнозув. НАН України. Київ, 2018. 200 с.
70. Державна служба статистики. Архів даних про відправлення (перевезення) вантажів за видами транспорту. 2017. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ2005/tz/tz_rik/tz_u/ts_u.htm (дата звернення: 19.03.2020).
71. Транспорт і зв'язок України. Статистичний збірник. 2018. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2019/zb/08/zb_tr2018pdf.pdf (дата звернення: 19.03.2020).
72. Підсумки роботи транспорту в січні-листопаді 2019 року. URL: https://logist.fm/news/pidsumki-roboti-transportu-v-sichni-listopadi-2019-roku (дата звернення: 19.03.2020).

73. Ukrstat.org – публікація документів Державної служби статистики України. Архів: Вантажні перевезення. 2016. URL: https://ukrstat.org/uk/operativ/operativ2016/tr/vp/vp_u/vp0316_u.htm (дата звернення: 19.03.2020).
74. Швець В. Я., Бойченко М. В. Аутсорсинг в логістиці автомобільних вантажоперевезень в Україні: стан, проблеми та перспективи. *Економічний вісник Донбасу*, 2019. № 3(57). С.103-108.
75. План розвитку єдиного європейського транспортного простору – на шляху до конкурентоспроможної та ресурсоефективної транспортної системи. URL: http://www. transportukraine. eu/sites/default/files/white_book_ transport_2050_ukr_0. pdf, 2011 (дата звернення: 19.03.2020).
76. Мелешенко С. Ю., Жихарев В.Я., Майборода И. Н. Представление и классификация моделей управления запасами. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. Харків. Нац. аэрокосм. ун-т Харк. авіац. ін-т, 2001. Вып. 9. С.225-243.
77. Про заходи щодо збереження автомобільних доріг загального користування Кабінет Міністрів України. Постанова від 27 червня 2007 р. Київ, 2007. № 879.
78. Шуліка О. О. Оцінка попиту на транспортні послуги в міжміському сполученні. *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля*. Сєвєродонецьк, 2015. №2(219). С. 53–57.
79. Болгар Т. М., Макоткіна О. В. Проблеми і перспективи розвитку вітчизняної транспортної галузі та сфери послуг в умовах невизначеності. *Європейський вектор економічного розвитку*, 2019. № 1 (26). С.19-26.
80. Асоціація міжнародних автомобільних перевізників України. Новини. URL: http://www.asmap.org.ua/index1.php?idt=59132 (дата звернення: 19.03.2020).
81. Шуліка О. О. Формування процесу доставки тарно-штучних вантажів автомобільним транспортом у міжміському сполученні: дис. … канд. техн. наук: 05.22.01. / Нац. б-ка України ім. В.І. Вернадського. Київ, 2017.

82. Chen Yee Ming, Wang, Bo-Yuan. Vehicle-based interactive management with multi-agent approach. *Journal of Industrial Engineering and Management*. Barcelona, 2009. Vol. 2, Iss. 2, p. 360-386, URL: http://hdl.handle.net/10419/188400

83. Горбачов П. Ф., Наглюк І. С., Макарічев О. В., Мосьпан Н. В. Оцінка ефективності стратегій перевізників з обслуговування разових замовлень на міжміські вантажоперевезення. *Автомобильный транспорт*: сб. науч. тр. Харків, 2015. Вип. 37. С. 61-69.

84. Мосьпан Н. В. Формування стратегій автотранспортних підприємств по обслуговуванню разових замовлень на перевезення вантажів у міжміському сполученні: дис. … канд. техн. наук 05.22.01 / Нац. б-ка України ім. В.І. Вернадського. Київ, 2018.

85. Apfelst A., Dashkovskiy S., Nieberding B. Modeling, optimization and solving strategies for matching problems in cooperative full truckload networks. *IFAC* PapersOnLine. Elsevier, 2016. URL: https://www.sciencedirect.com /science/article/pii/ S2405896316300040

86. Long Distance Freight Transport. A roadmap for System integration of Road Transport Version: 4.0. ERTRAC Working Group “Long Distance Freight Transport”. 2019. URL: https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/ modes/road/ consultations/doc/2008_03_26_its_roadmap_outline.pdf

87. Наумов В. С., Омельченко Т. А. Анализ современных информационных продуктов, использующихся при транспортно-экспедиторском обслуживании. *Автомобильный транспорт*. Харьков, 2013. Вып. 32, С. 85-89.

88. Антощишина Н. І. Інтеграційні процеси транспортної системи України в ЄС. Електронний журнал «Ефективна економіка» № 10, 2013. URL: http://www. economy. nayka. com. ua.

89. Николин В. И., Витвицкий Е. Е., Мочалин С. М. Грузовые автомобильные перевозки : монография. Сиб. гос. автомоб.-дорож. акад. 2-е изд. Омск, 2004. 480 с.

90. Парунакян В. Э., Сизова Е. И. Управление логистическими цепями в микропотоковых процессах при взаимодействии транспорта и производства. *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. Донецьк, 2009. №4. С. 18-25.
91. Алексеев В. О., Костюченко С. М. Оценка состояния транспортных систем в задачах управления движением. *Автомобильный транспорт*. Харьков, 2002. Вып. 9. С. 115-117.
92. Connected Automated Driving Roadmap. ERTRAC Working Group. Automated Driving. EU CAD conference Brussels 2019.
93. Raczkowski K. Schneider F., Laroche F. The impact of regulation of the road transport sector on entrepreneurship and economic growth in the European Union. (Warsaw, Linz, Lyon: Febr. 2017) Motor Transport Institute, 2017. 68.
94. A truly integrated transport system for sustainable and efficient logistics. The SETRIS project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 653739. URL: https://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id46/2017%20Integrated%20Logistics%20-%20SETRIS.pdf
95. Kural K., et al. FALCON IV: Validation of Smart Infrastructure Access Policy: *15th International Symposium on Heavy Vehicule Transport Technology: HVTT 15*. 2018. P. 14.
96. Kayikci Y. Sustainability impact of digitization in logistics. *Procedia Manufacturing*, 2018. 21. P. 782-789.
97. FREIGHTVISION - Sustainable European Freight Transport 2050: Forecast, Vision and Policy Recommendation Stephan Helmreich Hartmut Keller (Eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. 365 p. DOI 10.1007/978-3-642-13371-8.
98. AEROFLEX – Aerodynamic and Flexible Trucks for Next Generation of Long Distance Road Transport URL: https://aeroflex-project.eu/
99. Goel A. The minimum duration truck driver scheduling problem. *EURO Journal Transportation and Logistic*. 2012. Vol. 1. Issue 4. P. 285–306. URL:

http://intranet.paluno.uni-due.de/bibliography/aigaion2/index.php/attachments/single/283

100. Some ideas for freeway congestion mitigation with advanced technologies, Traffic Eng. Control. 2002. 43(10). P. 397-403.

101. Lai W. K., Kuo T. H., Chen C. H. Vehicle speed estimation and forecasting methods based on cellular floating vehicle data. *Applied Sciences*, 2016. 6(2). 47.

102. Balid W., Tafish H., & Refai H. H. Intelligent vehicle counting and classification sensor for real-time traffic surveillance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017. 19 (6), 1784-1794.

103. Ye F., Hao P., Qi X., Wu G., Boriboonsomsin K., & Barth M. J.. Prediction-based eco-approach and departure at signalized intersections with speed forecasting on preceding vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018. 20(4), 1378-1389. DOI 10.1109/TITS.2018.2856809

104. He Z. Research based on high-fidelity NGSIM vehicle trajectory datasets: A review. *Research Gate*, 2017. P. 1-33.

105. Coifman B., & Li, L.. A critical evaluation of the Next Generation Simulation (NGSIM) vehicle trajectory dataset. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017. 105, P. 362-377.

106. Волков В. П., Грицук І. В., Грицук Ю. В., Шурко Г. К., & Волков Ю. В. Особливості формування методики застосування класифікації умов експлуатації транспортних засобів в інформаційних умовах. *Вісник НТУ ХПІ*. Харків, 2017. № 14 (1236). С.10-20.

107. Djuric N., Radosavljevic V., Coric V., & Vucetic S.. Travel Speed Forecasting by Means of Continuous Conditional Random Fields. *Transportation Research Record*, 2011. 2263(1), 131–139. https://doi.org/10.3141/2263-15

108. Ma Y., Chowdhury M., Sadek A., & Jeihani M. Integrated traffic and communication performance evaluation of an intelligent vehicle infrastructure

integration (VII) system for online travel-time prediction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012. 13 (3), 1369-1382.

109. Khan S. M., Chowdhury M., Morris E. A., & Deka L. Synergizing Roadway Infrastructure Investment with Digital Infrastructure for Infrastructure-Based Connected Vehicle Applications: Review of Current Status and Future Directions. *Journal of Infrastructure Systems*, 2019. 25 (4), 03119001.

110. Ширяєва С. В., Свірін Д. О. Аналіз стану міжнародних автомобільних перевезень вантажів в Україні. *Вісник Національного транспортного університету.* Серія «Технічні науки». Наук.-техн. зб. Київ. НТУ, 2016. Вип. 1 (34). С. 554-560.

111. Mirzabeiki V. An overview of freight intelligent transportation systems. International Journal of Logistics Systems and Management (IJLSM), Vol. 14, No. 4, 2013, P. 473- 489.

112. Li L., Qu X., Zhang J., Wang Y., & Ran B. Traffic speed prediction for intelligent transportation system based on a deep feature fusion model. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2019. 23 (6), 605-616.

113. Roncoli C., Bekiaris-Liberis N., & Papageorgiou M.. Highway traffic state estimation using speed measurements: case studies on NGSIM data and highway A20 in the Netherlands. *arXiv preprint arXiv:* 2015. 1509.06146.

114. Servin O., Boriboonsomsin K., & Barth, M.. An energy and emissions impact evaluation of intelligent speed adaptation. In *2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference.* (2006, September) IEEE. pp. 1257-1262.

115. Zhu L., Holden J., Gonder J., & Wood E.. *Green Routing Fuel Saving Opportunity Assessment: A Case Study on California Large-Scale Real-World Travel Data* (No. NREL/CP-5400-68194). National Renewable Energy Lab.(NREL), 2017. Golden, CO (United States).

116. Миротин Л. Б., Корчагин В.А., Ляпин С.А., Некрасов А.Г. Логистические цепи сложно-технологических производств: Уч. пособие. Москва, 2005. 288 с.

117. Parunakjan V., Sizova E. Designing of logistical chains inside production and transport system of metallurgical enterprise. *Transport Problems*, 2013. Vol. 8. Issue 1. P. 36-45.

118. Толуев Ю.И., Некрасов А.Г., Морозов С.И. Анализ и моделирование материальных потоков в сетях поставок. *Интегрированная логистика.* Москва, 2005. № 5. С. 7-14.

119. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с анг. Москва. Мир, 1984. 264 с.

120. Чухрай Н. І. Гірна О.М. Формування ланцюга поставок: питання теорії і практики. Львів. „Інтелект-Захід", 2007. 237 с.

121. Бережна Н. Г., Біляєва О. С., Войтов В. А., Горяїнов О. М., Карнаух М. В., Кравцов А. Г., Кутья О. В., Музильов Д. О., Шраменко Н. Ю. Проблеми транспортно-логістичного забезпечення в аграрній галузі: монографія. Харків. Міськдрук, 2019. 180 с.

122. Алесинская Т.В. Основы логистики. Общие вопросы логистического управления. Таганрог. Изд-во ТРТУ, 2005. 121 с.

123. Баранов Г. Л. Інформаційно-аналітичне забезпечення інтелектуальних систем (інтеграція інформаційних технологій на транспорті): монографія. Київ. НТУ, 2009. 197 с.

124. Воркут А. И. Грузовые автомобильные перевозки. Київ. Вища школа, 1986. 477с.

125. Геронимус Б. Л., Царфин Л. В. Экономико-математические методы в планировании на автомобильном транспорте. Москва. Транспорт, 1977.

126. Житков В. А., Ким К. В. Методы оперативного планирования грузовых автомобильных перевозок. Москва. Транспорт, 1982.

127. Левковець П. Р., Грисюк Ю. С. Моделювання та оптимізація управління процесами функціонування підприємств автомобільного транспорту. Управління проектами, системний аналіз і логістика. Тех. серія. 2010. Вип. 7. С. 327-335. URL: http://nbuv.gov.ua/ UJRN/ Upsal_2010_7_83

128. Карачун С. М., Беляев В. М. Метод определения структуры и численности парка автомобилей при доставке грузов на развозочно-сборочных маршрутах. *Повышение эффективности перевозок грузов автомобильным транспортом*. Москва. НИИАТ, 1982. С. 34-37.

129. Нефедов Н. А. Разработка методов планирования работы автомобилей на развозочных маршрутах: автореф. дисс. … к. т. н: 05.22.10. Харьков, 1991. 23 с.

130. Маяк М. М., Мельничук С. В., Кравченко О. М., Рафальський О. І. Оптимізація вибору рухомого складу для пасажирських автомобільних перевезень в м. Житомир. *Вісник СевНТУ*. Сер. : Машиноприладобудування та транспорт, 2013. Вип. 143. С. 192-195. URL: Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsntum_2013_143_48

131. Цветов Ю. М., Един, М. В., Макаренко Л. Н., Соколов М. Ю. Цветов Основы организации транспортного обеспечения внешнеторговых связей Украины / ред. Ю. М. Цветов. Ин-т (Центр) комплекс. трансп. проблем. Киев, 2000. С. 561-577.

132. Новикова А. М. Україна в системі міжнародних транспортних коридорів. Київ. НІПМБ, 2003. 494 с.

133. Підсумки та тенденції розвитку міжнародних автомобільних перевезень. Урядовий портал. Новини. URL: http:// www.kmu.gov.ua /control /uk/publish /printable_article?art_id =26673380

134. Прокудін Г. С. Моделі і методи оптимізації перевезень у транспортних системах. Київ. НТУ, 2006. 224 с. – Бібліогр.: с. 217–222.

135. Прокудін Г. С. Модифікація методу Дейкстри стосовно розв’язання сітьових транспортних задач. *Вісник НТУ та ТАУ*. Київ. НТУ, 2002. № 7. С. 195–198.

136. Danchuk V., Bakulich O., Svatko V. An improvement in ant algorithm method for optimizing a transport route with regard to traffic flow. *Procedia Engineering,* 2017. №187. P. 425 - 434.

137. Прокудін Г. С. Організація перевезень вантажів на ТМ з обмеженнями на пропускні здатності її вузлів і комунікацій. *Вісник НТУ*. Київ. НТУ, 2007. № 14. С. 152–161.

138. Prokudin G., Chupaylenko O., Dudnik O., Dudnik A., Omarov D. Improvement of the Methods for Determining Optimal Characteristics of Transportation Networks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016. 6/3 (84). P. 54-61. DOI:10.15587/1729-4061.2016.85211.

139. Прокудін Г. С. Організація вантажних перевезень на транспортних мережах з обмеженням їх пропускної здатності. *Електроніка та системи управління*. Київ. НАУ, 2011. №1(27). С. 115-121.

140. Hanshar F., Ombuki-Berman B. Dynamic vehicle routing using genetic algorithms. *Appl Intell*, 2007. 27: 89. URL: https://doi.org/10.1007/s10489-006-0033-z

141. Базилевич Р., Кутельмах Р. Дослідження ефективності існуючих алгоритмів для розв'язання задачі комівояжера. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. Львів, 2009. № 650. С. 235-244.

142. Golden B. L., Raghawan S., and Wasil E. A. The Vehicle Routing Problem. *Springer Science & Business Media*. New York, 2008.

143. Dantzig G., Ramser J., The Truck Dispatching Problem. Management Science, 1959. Vol. 6. No. 1. pp. 80-91. DOI:10.1287/mnsc.6.1.80

144. Laporte G. The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms. *European Journal of Operational Research* , 1992. Vol. 59. No. 3. pp. 345-358. DOI:10.1016/0377-2217(92)90192-C

145. 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.

146. Ritzinger U., Puchinger J., and Hartl Richard F. A survey on dynamic and stochastic vehicle routing problems. *International Journal of Production Re-*

search. Taylor Francis, 2016. 54 (1), DOI.10.1080/00207543. 2015.1043403. Available from: https://hal.inria.fr/hal-01224562

147. Goel A. & Vidal T. Hours of service regulations in road freight transport: An optimization-based international assessment. *Transportation Science,* 2014. 48(3). P. 391-412.

148. Maden, W., Eglese R., Black, D. & et al. Vehicle routing and scheduling with time-varying data: A case study. *Journal of the Operational Research Society,* 2010. Vol. 61. No. 3. P. 515-522.

149. Lund K., Madsen O. B. G., and Rygaard J. M. Vehicle Routing Problems with Varying Degrees of Dynamism. Technical report, IMM. The Department of Mathematical Modelling. Technical University of Denmark. 1996.

150. Huang Z.C., Hu X.L., Chen S.D. Dynamic Traveling Salesman Problem based on Evolutionary Computation: In Congress on Evolutionary Computation. IEEE Press, 2001. pp. 1283-1288.

151. Azi N., Gendreau M., and Povin J.-Y. A dynamic vehicle routing problem with multiply delivery route. *Annals of Operations Research.* Springer, 2012. 199: 103. URL: https://doi.org/10.1007/s10479-011-0991-3

152. Flatberg T, Hasle G., Kloster O., Nilssen E.J., Riise A. 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*. Springer US, 2007. vol 38, 41–63.

153. Van Woensela T., Kerbacheb L., Peremansc H. et al. Vehicle routing with dynamic travel times: a queueing approach. *European Journal of Operational Research,* 2008.·URL: https://www.researchgate.net/publication/220288626

154. Прокудін Г. С. Розв'язання нестандартних транспортних задач про призначення. *Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. трудов*. Севастополь, 2007. № 10. С. 111 - 115.

155. Уотерс Д. Логистика: управление цепью поставок: Пер. с англ. Москва. ЮНИТИ, 2003. 503 с.

156. El-Sherbeny N.A. Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods *N.A. Journal of King Saud University*, 2010. vol. 22, 123–131. DOI: 10.1016/j.jksus.2010.03.002

157. Larsen A., Madsen B., Solomon M. The A Priori Dynamic Traveling Salesman Problem with Time Windows. *Transportation Science*, 2004 38(4) : 459–472

158. Sergienko I. V., Shylo V. P. Problems of discrete optimization: challenges and main approaches to solve them. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2006. Vol. 42, No. 4, pp. 465-482.

159. Беленький А. С., Левнер Е. В. Применение моделей и методов теории расписаний в задачах оптимального планирования на грузовом транспорте. *Автоматика и телемеханика*, 1989. №1. С. 3-77.

160. D'Ariano A., Pacciarelli D., Pranzo M. A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network. *European Journal of Operational Research*, 2007. Volume 183, Issue 2, 643-657. URL: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.034.

161. Притула Н., Єлейко Я., Притула М. Нелінійні транспортні задачі на зважених графах. *Вісник Львів. ун-ту*. Сер. прикл. матем. та інформ, 2006. Вип. 11. С. 244-254.

162. Воркут А. І., Ковалик А. Г., Іванов Д. В. Надійність як умова гарантованого транспортного обслуговування. *Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів*: Зб. наук. пр. Київ. УТУ, ТАУ, 1998. Вип. 5. С. 69-72.

163. Доля В. К. , Горяинов А. Н., Шептура А. Н. Влияние параметров работы автомобильного транспорта на функционирование логистической системы. *Автомобильный транспорт*: Сб. научн. трудов. Харьков: ХГАДТУ, 2000. Вып. 4. С. 77-79.

164. Васелевський М., Білик І., Дейнека О. та ін. Економіка логістичних систем : монографія / за заг. ред. Є. Крикавського та І. Кубіва. Львів. Національний Університет «Львівська політехніка», 2008. 596 с

165. Воркут Т. А. Моделювання процесів і параметрів перевезень у взаємодіючих накопичувальних системах. *Вісник північного наукового центру транспортної академії України*, 2003. Випуск 6. С.92-93.

166. Шевчук Я. В. Імітаційне моделювання транспортних систем. *International scientific journal*, 2016. № 1(2). С. 116-121. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnj_2016_1%282%29_35

167. Chang Y., Makatsoris H. Supply chain modeling using simulation. *I. J. of simulation*, 2009. Vol. 2 No. 1. URL: http://scholar.google.com.ua/scholar?q

168. Смрковская В. Ю. Моделирование процесса формирования схем доставки грузов. *Вестник ОНМУ*: Сб. науч. трудов. Одесса. ОНМУ, 2007. № 21. С. 155-171.

169. Левковець П. Р., Бєляєвський Л. С., Топольськов Є. О., Сердюк А. А. Застосування методів просторово-часової обробки інформації в диспетчерських центрах при вирішенні задач управління міським пасажирським автотранспортом. *Вісник НТУ*. Київ, 2006. №13. Ч.2. С.44-50.

170. Dominiak C. The discrete interactive multiple goal programming under risk. Multiple criteria decision making. *University of Economics in Katowice*, 2012. 7: 59-70.

171. Васильева Е. М., Левит Б. Ю., Лившиц В. Н. Нелинейные транспортные задачи на сетях. Москва. Финансы и статистика, 1981. 138с.

172. Котенко А. М., Ковальов А. О. Логістична модель доставки вантажу від відправника до одержувача. Зб. наук. праць. Харків. УкрДАЗТ, 2003. № 53. С. 25-29.

173. Парунакян В. Э., Гусев Ю. В., Сизова Е. И. К вопросу формирования логистических цепей в транспортно-грузовых системах металлургических предприятий. *Вісник Приазовського державного технічного університету,* 2006. № 16. С. 220-226.

174. Яковлева Я. С., Дудніков О. М., Сокирко В. М. Удосконалення існуючої методики організації перевезення штучних дрібнопартійних вантажів автомобільним транспортом з урахуванням змін потреби вантажу у замов-

ників продовж доби. *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту,* 2009. № 2(9). С. 81-87.

175. Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. Москва. Наука, 1966. 431 с.

176. Приймак М. В., Мацюк О. В., Маєвський О. В., Прошин С .Ю. Моделі та методи дослідження систем масового обслуговування марківського типу в умовах стохастичної періодичності та їхнє застосування в енергетиці. *Технічна електродинаміка,* 2014. № 2. С. 11-16.

177. Приймак М. В., Дмитроца Л. П. Розвиток теорії періодичних функцій та їх узагальнення – функції із змінним періодом. *П'ятнадцята міжнародна наукова конференція ім. акад. Михайла Кравчука*: матеріали конф. Т. 2. Алгебра. Геометрія. Математичний аналіз. (Київ. 15-17 травня. 2014). Київ. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. С. 156-158.

178. Беленький А.С., Левнер Е. В. Применение моделей и методов теории расписаний в задачах оптимального планирования на грузовом транспорте. *Автоматика и телемеханика,* 1989. №1. С. 3-77.

179. Давідіч Ю. О. Розробка графіка руху транспортних засобів при організації вантажних перевезень: навч. посіб. Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. Харків. ХНАМГ, 2010. 345 с.

180. Современные проблемы теоретической кибернетики. Отчет о научно-исследовательской работе в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013. Новосибирск, 2010. 65 с. URL: http://math.nsc.ru/ FCP/5_14_740_11_0362.pdf

181. Танаев В. С., Сотсков Ю. Н., Струсевич В. А. Теория расписаний. Многостадийные системы. Москва. Наука, 1989. 328 с.

182. Лазарев А. А. Методы и алгоритмы решения задач теории расписаний для одного и нескольких приборов и их применение для задач комбинаторной оптимизации. автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук. Москва, 2007. 36 с.

183. B´ela Vizva´ri. The Branch and Bound Method. (RRR 26-2010. December 2010). 56 p.

184. Муляревич О., Голембо В. Вирішення проблем при розв'язанні динамічної асиметричної задачі комівояжера в умовах частково невідомих вхідних даних. *Наук вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи та компоненти,* 2015. Том. 6. Вип. 1. С. 21-29.

185. Pinedo L. Michael. Scheduling Theory, Algorithms, and Systems. Springer Science+Business Media. LLC, 2016. 674.

186. Kerbache L., Van Woensel T. Planning and Scheduling Transportation Vehicle fleet: in *a Congested Traffic Environment* URL: https://www.academia.edu/20610565/Planning_and_scheduling_transportation_vehicle_fleet_in_a_congested_traffic_environment

187. Дорош В. М. Аналіз типових транспортно-технологічних систем доставки швидкопсувних харчових продуктів. *Автошляховик України*, 2011. №6. С.17-22.

188. Кристофер М. и др. Логистика и управление цепочками поставок. Под общ. ред. В.С. Лукинского. Санкт-Петербург. Питер, 2004. 316 с.

189. Дзінько А. М. Мультиагентний підхід до автоматизації процесів керування матеріальними потоками в логістичних системах : автореф. дис. … канд. техн. наук. 05.13.07. Нац. техн. ун-т України "Київський політехн. ін-т ім. І. Сікорського". Київ, 2017. 20 с.

190. Приймак М. В., Маєвський О. В., Мацюк Г. В. Шимчук. Моделі та інформаційні технології дослідження стохастично періодичних потоків. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Інформаційні системи та мережі*, 2015. № 832. С. 242-253.

191. Райхард Юнеманн. Материальные потоки в логистике. Берлин. Шкрингер, 1989. 286 с.

192. Kozachenko D., Vernigora R., Balanov R. & et al. Evaluation of the transition to the organization of freight trains traffic by the schedule. *Transport Problems*, 2016. Vol. 11. Issue 1. P. 41-48.

193. Kampmeyer T. Cyclic Scheduling Problems. Dissertation. Fachbereich Mathematik. Informatik Universitat Osnabruck. Available URL: http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/dissts/Osnabrueck/Kampmeyer2006.pdf

194. Горбачев П. Ф., Дмитриев И.А. Основы теории транспортных систем : учеб. пособ. Харьков. ХНАДУ, 2002. 202 с.

195. Akan B., Ameri E.-A., Curuklu B. Scheduling for Multiple Type Objects Using POPStar Planner. *Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. Barcelona, 2014. P. 1-7. URL: http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:mdh:diva-26465

196. Зуховицкий С. И., Авдеева Л. И. Линейное и выпуклое программирование. Москва. Наука, 1967. 460 с.

197. Ivanov D., Sokolov B., Werner F., Dolgui A. Proactive scheduling and reactive real time control: in Industry 4.0 manufacturing systems. Preprint, OvGU Magdeburg, 2018. 1.

198. Dorit S., Hochbauma A. L. Cyclical scheduling and multi-shift scheduling: Complexity and approximation algorithms. *Discrete Optimization*, 2006. Vol. 3. P. 327-340.

199. Roundy R. Cyclic schedules for job shops with identical jobs. *Mathematics of Operations Research*, 1992. 17(4). P 842-865.

200. Marius M. Solomon Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 2006. Vol. 35. № 2. P. 254-265.

201. Montemanni R. A New Algorithm for a Dynamic Vehicle Routing Problem Based on Ant Colony System. *Workshop on Freight* , 2003. URL: http://people.idsia.ch/~luca/Montemanni%20et%20al..pdf

202. Hanshar F., Ombuki-Berman B. Dynamic vehicle routing using genetic algorithms. Appl Intell, 2007. 27: 89. URL: https://doi.org/10.1007/s10489-006-0033-z

203. Коренблюм Б. И., Рыбальский В. И., Хацет Б. И. Об одной экстремальной задаче, связанной с сетевой моделью проекта: в кн. *Сетевое планирование и управление*. Москва. Наука, 1965. С. 272–285.

204. European agreement concerning the work of crews of vehicles engaged in international road transport (AETR) (Consolidated version*). ECE/TRANS/SC.1/386/Add.1. 2010. 48 p.

205. Пасічник А. М. , Мороз Б. І. , Кузьменко А. І. Застосування супутникових та геоінформаційних технологій в системах управління перевезенням вантажів. *Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів і поїздів*, 2013. №21. С178-184.

206. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Москва, 1970. 510 с.

207. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва. Высшая школа, 2003. 479 с.

208. Семкович А. Д. Кузьминский Р. Д., Кульчицкий-Жигайло Р. Д. Алгоритм моделирования разветвлённого процесса разборки-сборки ремонтируемого объекта. *Повышение надёжности сельскохозяйственной техники*: Сб. науч. тр. Елгава. Латв. СХА, 1990. Вып. 267. С.13-23.

209. Bernhardt A., Melo T., Bousonville T., Kopfer H. Scheduling of driver activities with multiple soft time windows considering European regulations on rest periods and breaks. *Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der htw saar. Schriftenreihe Logistik der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der htw saar* Saarbrücken, 2016. No. 12. 143 p.

210. Бондарєв С. І. Обґрунтування математичної моделі розрахунку тривалості оборотного рейсу при виконанні міжнародних автоперевезеннях. *Scientific Journal «ScienceRise»,* 2014. No 3/2(3). С. 7-10.

211. Hokey Min. Combined Truck Routing and Driver Scheduling Problems under Hours of Service: Regulations Final Report. Bowling Green State University, 2009. 47.

212. Prokudin G., Chupaylenko O., Dudnik O. et al. Application of information technologies for the optimization of itinerary when delivering cargo by

automobile transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 2018. No 2/3 (92). P. 51-59.

213. Prokudin G. Chupaylenko O., Dudnik O., Dudnik A., Omarov D.. Improvement of the Methods for Determining Optimal Characteristics of Transportation Networks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 2016. N. 6/3 (84). 54–61. URL: DOI: https//doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85211

214. Jean-Yves P., Ying X., Benyahiac I. Vehicle routing and scheduling with dynamic travel times. *Computers & Operations Research*, 2006. No 33. P. 1129–1137.

215. Vidit D. S. Time Dependent Truck Routing and Driver Scheduling Problem with Hours of Service Regulations. PhD thesis. Northeastern University. Boston, Massachusetts 2008. 126 p.

216. Chryssi M. Time Dependent Vehicle Routing Problems: Formulations, Properties and Heuristic Algorithms. *Transportation Science,* 1992. Vol. 26. Issue 3. P. 161-260.

217. Алексеев В. О., Костюченко С. М., Неронов С. Н., Суярко Ю. М. О принципах разработки мехатронных систем. Вестник ХГАДТУ, 2001. вып. 15-16. С. 140-143.

218. Amthor M., Hartmann B., Denzler J. Road condition estimation based on spatio-temporal reflection models: In *German Conference on Pattern Recognition.* (Cham. 2015, October). Springer. Chamб 2015. pp. 3-15.

219. Do L. N., Vu H. L., Vo B. Q., Liu Z., & Phung, D. An effective spatial-temporal attention based neural network for traffic flow prediction. *Transportation research part C: emerging technologies*, 2019. 108, 12-28.

220. Sumit, S. H., Akhter S. C-means clustering and deep-neuro-fuzzy classification for road weight measurement in traffic management system. *Soft Computing*, 2019. *23*(12), 4329-4340.

221. Englund C., Meyer G., Beiker S. (eds.) Enabling Technologies for Road Vehicle Automation. *Road Vehicle Automation 4. Lecture Notes in Mobility*, 2018. 266 p. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-319-60934-8_15.

222. Willemsen D., Schmeitz A., Fusco M., et al. Requirements Review from EU projects. D2.1 of H2020 project ENSEMBLE, 2018. 108. URL: https://platooningensemble.eu.

223. Кульбашная Н. И., Сорока К. А. Разработка модели выбора скорости движения водителем с учетом дорожной обстановки. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2016. 3/2 (81). С. 22-29. URL: DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71489.

224. Кужель В. П., Кашканов А. А., Кашканов В. А. Методика зменшення невизначеності в задачах автотехнічної експертизи ДТП при ідентифікації дальності видимості дорожніх об'єктів в темну пору доби : монографія. Вінниця. ВНТУ, 2010. 200 с.

225. Волков В. П., Грицук І. В., Грицук Ю. В. [та ін.] Особливості формування методики застосування класифікації умов експлуатації транспортних засобів в інформаційних умовах ITS. *Вісник Національного техн. ун-ту «Харківський політехнічний ін-т»*, 2017. № 14 (1236) С. 10-20.

226. Hegyi A. Model Predictive Control for Integrating Traffic Control Measures. TRAIL Thesis Series T2004/2. The Netherlands TRAIL Research School, 2004. 232.

227. Савватеев И. Г. Двунаправленные системы управления автомобилем в потоке с использованием средств коммуникабельности. Сборник научных трудов СевКавГТУ. Серия «Естественнонаучная», 2007. № 3. URL: http://www.ncstu.ru

228. Семенов В. В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса. Москва, 2004. 44 с. (Препринт № 34 Москва: Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша; 2004). URL : http://spkurdyumov.ru/uploads/2013/08/Semenov.pdf.

229. Процишин О. С. Дослідження миттєвих швидкостей руху у транспортному потоці. Міжвузівський збірник *Наукові Нотатки*. Луцьк, 2014. Вип. № 45. С. 448 – 452.

230. Liu H., hiraoka T., Tanaka S. Explicit behavior saffected by driver's trust in a driving automation system. *Proceedings of the 5th International Symposium on Future Active Safety Technology toward Zero Accidents* (FAST-zero'19) (September 9-11. 2019. Blacksburg). Blacksburg, 2019.

231. Ioannou P. A., Chien C. C. Autonomous Intelligent Cruise Control. *IEEE transactions on vehicular technology*, 1993. vol. 42, N 4, P. 657 – 672.

232. Коваленко Л. О. Аналіз умов та безпеки руху на автомобільних дорогах з урахуванням інформаційних показників дорожнього середовища. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, 2013. Вип. 88. С. 294 – 301. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb_2013_88_34.

233. Карпінський Ю. О., Лященко, О. П., Дроздівський А. А. Геоінформаційне забезпечення навігації наземного транспорту. *Наука та інновації*, 2007. Т. 3. № 1. С. 43 – 57.

234. Hallenbeck M., McCormack E., Nee J., Wright D. Freight Data from Intelligent Transportation System Devices. WA-RD 566.1. Washington State Department of Transportation, 2003. 117. URL: https://www.wsdot.wa.gov

235. Srour F. J., Newton D. Freight-specific data derived from Intelligent Transportation Systems. Potential Uses in Planning Freight Improvement Projects. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* 1957, 2006. P. 66-74. URL: DOI: 10.3141/1957-10 66-74.

236. Young K., Regan M. Intelligent speed adaptation: A review. *Proceedings of the Australasian Road Safety Research Policing and Education Conference*, 2002. P. 445-450. URL : https://pdfs.semanticscholar.org.

237. Рабинович Э. Х., Волков В.П., Белогуров Е. А., Белошицкий В. В. Определение сопротивлений движению автомобиля Chevrolet Aveo методом выбега. *Автомобильный транспорт,* 2011. Issue. 28. P. 18-22. URL: http://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/handle123456789/86

238. Matsumoto S., Park T., Kawashima H. A Comparative Study on Fuel Consumption Reduction Effects of Eco-Driving Instructions Strategies. *Int. J. ITS Res.* URL: http://link.springer.com/article/10.1007/s13177-013-0066

239. Lashenyh A., Turpak S., Gritcay S., Vasileva L., Ostrohlyad E. Development of mathematical models for planning the duration of shunting operations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 2016. No. 5/3 (83). P. 40-46.

240. Wu N., Brilon W. Cellular automata for highway traffic flow simulation. *Traffic and Mob*ility, 1999. URL : http://homepage.rub.de/ning.wu

241. Сахно В. П., Жаров К. С. До визначення їздових циклів та поздовжніх профілів доріг. *Автошляховик України*, 2012. № 1 (225). С. 7–11.

242. Говорущенко Н. Я. Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте. Москва. Транспорт, 1990. 135 с.

243. Мокін О. Б., Фолюшняк О. Д., Мокін Б. І., Лобатюк В. А. Ідентифікація математичних моделей оптимального руху електромобіля горизонтальним відрізком автомагістралі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2014. № 1. URL: http://visnyk.vntu.edu.ua

244. Хабутдінов Р. А. Транстехнологічна парадигма теорії управління на транспорті та методи системного експлуатаційно-технологічного ресурсозбереження. *Вісник Національного транспортного університету*, 2013. 28: 483-488.

245. Дорош В. М. Оптимізація транспортно-технологічних схем доставки тарно-поштучних швидкопсувних вантажів: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. В. М. Дорош; Нац. трансп. ун-т. Київ, 2014. 20 с.

246. Прокудін Г. С., Дехтярук М. Т. Комп’ютерне моделювання термінальних вантажних перевезень. *Моделювання та інформаційні технології*, 2009. № 2 (52). URL: http://www.nbuv.gov.ua/portal.

247. Наумов В. С., Омельченко Т. А. Визначення перспективних напрямків в області підвищення ефективності контейнерної транспортної системи. *Транспортні системи та технології перевезень*, 2013, 6: 72-75.

248. Зайченко Ю. П. Комп’ютерні мережі. Київ. Видавничий дім "Слово", 2003. 288 с.

249. Буров Є. Комп'ютерні мережі. Львів, 2003. 584 с.

250. Куниця А. В., Обіщенко В. Г. Формалізація схеми взаємозв'язку між складовими операціями процесу доставки вантажів. *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту*, 2010. № 2(11). С. 37-42.

251. Погрузочно-разгрузочные машины: Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. Москва. Транспорт, 1981. 448с.

252. Енглезі І. П. Аналіз технічних розробок транспортних засобів для перевезення партіонних тарно-штучних вантажів з метою підвищення їх використання. *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*, 2011. №1. С. 30-34.

253. Кравченко О. П., Панайотов К. К. Щодо визначення довжини черги вантажних автомобілів при обслуговуванні навантажувальних бункерів безперервних виробництв. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 2014. № 2. С. 73-78. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN

254. Кравченко А. П. Методы решения задач повышения эффективности эксплуатации автопоездов. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства "Технічний сервіс АПК, техніка і технології у сільськогосподарському машинобудуванні*". Харків. ХДТУСГ, 2004. Вып. 23. С. 274 - 277.

255. Марчук Р. М. Визначення навантаження на осі автопоїзда-контейнеровоза. *Вісник НТУ*. Збірник наукових праць НТУ, 2011. Вип. 24(1), №29, С. 115-118.

256. Глінчук В.М. Вибір та обґрунтування типу та складу причіпних ланок триланкових автопоїздів. Дис. … канд. техн. наук 05.22.02. Національний транспортний університет. Київ, 2009. 236 с.

257. Morabito R., Morales S. A simple and effective recursive procedure for the manufacturer's pallet loading problem. *Journal of the Operational Research Society,* 1998. Vol. 49. Issue 8. 819-828.

258. Jie Wei, Stephen C.H. Leung. A simulation modeling and analysis for RFID-enabled mixedproduct loading strategy for outbound logistics: A case study. *Computers & Industrial Engineering*, 2011. Vol. 61. Issue 1. P. 209-215.

259. Гамеляк І. П., Райковський В. Ф. Експериментальне визначення навантаження на вісь транспортних засобів. *Науково-виробничий журнал*, 2014. № 3 (239). С. 25-29.

260. Абрамов Д. В. Предельные динамические показатели переднеприводных легковых автомобилей с учетом подъемной аэродинамической силы. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Наук. журнал*. Луцьк. Луцький НТУ, 2015. №1(3). С.10-15.

261. Axle Load Calculation and Load Planning Software. *Truck, Trailer, Container & Railcar*. URL http://www.loadxpert.com/index.htm

262. Chana T. H. T., Yua L., Lawa S. S., Yungb T. H. Moving force identification studies, I: Theory. *Journal of Sound and Vibration*, 2001. Vol. 247. Issue 1. 59–76

263. Samir V., Amiouny John J., Bartholdi III John H., Zhang V. V. J. Balanced Loading. *Operations Research*, 1992, Vol. 40, Issue 2, 238-246.

264. Eberhard E. Stability aspects of pallet loading. *Operations-Research-Spektrum*, 1991. Vol.13. Issue 4. pp 189–197.

265. Truck Loader. URL: http://www.TLrun.com

266. Automated cargo loading system. United States Patent 5,015,145 May 14, 1991.

267. Eric D- De. Wilde truck cargo management RFID tags and interrogators. United States. Patent Application Publication Pub. No.: US 2004/0069850 A1 Apr. 15, 2004.

268. Шраменко Н. Ю. Разработка имитационной модели функционирования грузового терминального комплекса. *Автомобильный транспорт*: сб. науч. тр. Харків. ХНАДУ, 2010. Вип. 27. С. 77-82.

269. Zhivitskaya H. Topological properties and methodology of research of complex logistic systems efficiency. ECONTECHMOD. An International Quarterly Journal On Economics: in *Technology, New Technologies And Modeling Processes*, 2014. Vol. 3. No. 3. 23-33.

270. Bulgakova J. The model of work in process inventory management of rail cars building company. *Transport problems*, 2013. Volume 8. Issue 4. 129-136.

271. Sivakumar A. Modelling Transport: *A Synthesis of Transport Modelling Methodologies*. Mimeo Imperial College, 2009 URL: http://www3.imperial.ac.uk (last accessed December 30th).

272. Кутах О. П. Моделювання транспортних систем. Київ. Київ. ун-т економіки і технологій транспорту, 2004. 196 с.

273. Захаров Ю. И., Карнаух Е. С. Основные современные инструменты имитационного моделирования транспортных потоков. *Вісник ПДАБА*, 2014. №1 (190). С. 46 – 51. URL: http://visnyk.pgasa.dp.ua/article.

274. Owens C. R. JR., Warner T. Concepts of Logistics System Design. Arlington, Va.: Family Planning Logistics Management / John Snow Inc., for USAID, 1996. 27.

275. Данько М.І., Ходаківський О.М., Бондаренко Б.Р., Драгіцин О.Г., Лапко О.О., Соколов Д.М. Огляд закордонних наукових розробок і практичного досвіду функціонування та розвинення транспортних систем. *Організація та управління процесом перевезень*. Зб. наук. праць ДонІЗТ, 2013 № 36 С.10-15.

276. Saaty T. L. Elements of queueing theory: with applications. Michigan. McGraw-Hill. University of Michigan, 1961. p. 556.

277. Литвинов А. Л. Теорія систем масового обслуговування : навч. посібник. Харків. ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 141 с.

278. Ivanov D., Sokolov B. Control and system-theoretic identification of the supply chain dynamics domain for planning, analysis, and adaptation of performance under uncertainty [Virtual Resource]. *European Journal of Operational Research*, 2013. 224(2). URL : DOI: 10.1016/j.ejor.2012.08.021.

279. Golubenko A., Gubacheva L., Andreev A. Forming of logistical system of organization of freight transportations in megapolises. Transport Problems, 2009. Vol. 4. Issue 1. Part 2. pp. 97-103.

280. Stetsenko I. V. State equations of stokhastic timed Petri Nets with Informational relations. *Cybernetics and Systems Analysis,* 2012. Vol. 48. No 5. P. 784-797.

281. Disney S. M., Towill D.R. A discrete transfer function model to determine the dynamic stability of a Vendor Managed Inventory supply chain. International Journal of Production Research, 2002. Vol. 40, No. 1. URL : https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/ 00207540110072975

282. Васянин В. А. Компьютерное моделирование распределения и маршрутизации дискретных многопродуктовых потоков в коммуникационной сети. *Управляющие системы и машины,* 2016. № 3. С. 43-53.

283. Qiu, T. Z., Lu, X. Y., Chow, A. H., & Shladover, S. E. Estimation of freeway traffic density with loop detector and probe vehicle data. *Transportation Research Record*, 2010. 2178 (1). 21-29.

284. Barros, J., Araujo, M., & Rossetti, R. J.. Short-term real-time traffic prediction methods: A survey. In *2015 International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems.* (MT-ITS. 2015. June). pp. 132-139). IEEE, 2015. p. 132-139.

285. Dey, K. C., Yan, L., Wang, X., Wang, Y., Shen, H., Chowdhury, M., ... & Soundararaj, V.. A review of communication, driver characteristics, and controls aspects of cooperative adaptive cruise control (CACC). *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015. 17 (2), 491-509.

286. Семкович А. Д. Аксиомы ремонтно-восстановительного процесса и направления его оптимизации. *Совершенствование ремонтно-восстановительных процессов в отраслях АПК*. Львов, 1988. С.6-13.

287. Кузьмінський Р. Д., Кульчицький-Жигайло Р. Д. Алгоритм структурного моделювання прямоточних технологічних процесів розбирання та складання. *Організаційно-технологічна взаємодія підприємств АПК в процесі ремонту сільськогосподарської техніки*. Львів. Львів. с.-г. ін-т, 1991. С.12-20.

288. Хабутдінов Р. А. Новаційне і ресурсозберігаюче вдосконалення автотранспортної системи. *Вісник Національного транспортного університету*, 2010. 21 (2): 127-131.

289. Clarridgea A., Salomaab K. Analysis of a cellular automata on model for car traffic with a slow-to-stop rule I. *Proceedings of the 14th International Conference on Implementation and Application of Automata*, 2009. URL: http://homepage.rub.de/ning.wu/pdf/ca_14isttt.pdf.

290. Бекмагамбетов М. М., А. В. Кочетков. Анализ современных программных средств транспортного моделирования. *Журнал автомобильных инженеров*, 2012. №6 (77). С. 25-34 URL : http://www.aae-press.ru/f/77/25.pdf.

291. Іванов В. О. Розподілена система імітаційного моделювання дорожнього руху. *Вісник Національного технічного ун-ту України Київський політехн. ін-т. Інформатика, управління та обчислювальна техніка*, 2008. № 48. С. 41-45.

292. Нагорний Є. В., Шраменко Н. Ю., Орда О. О. Математична модель вибору раціональних стратегій поведінки транспортно-експедиторських підприємств при взаємодії із суб'єктами транспортного ринку на умовах кооперації. *Автомобильный транспорт*, 2017. вып. 40. С.12-19.

293. Гумен М. Б., Співак В. М., Мещанінов С. К., Власюк Г. Г., Гумен Т. Ф. Основи теорії процесів в інформаційних системах: підручник (у 2-х кн.). Кн.1. Аналіз детермінованих процесів. 2-е вид., зі змінами і доповн. Київ. Кафедра, 2017. 281 с.

294. Шраменко Н. А. Аналіз теоретичних розробок в області організації дрібнопартіонних перевезень та функціонування термінальних систем *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 2010. Вип. 29. С. 90-94.

295. Гащук П.М. Оптимизация топливо-скоростных свойств автомобиля. Львов. Вища шк. Из-во при Львов. ун-те, 1987. 168 с.

296. Гащук П.М. Енергія та упорядкований рух. Львів. «Українські технології», 2004. 606 с.

297. Жураковський Ю.П., Полторак В.П. Теорія інформації та кодування: підручник. Київ, 2001. 255 с.

298. Janicki A., Izydorczyk A. Komputerowe metody w modelowaniu stochastycznym: modele w finansach, technice i biologii, algorytmy numeryczne i statystyczne, symulacja i wizualizacja zjawisk losowych, autorski pakiet komputerowy SDE-Solver. *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, 2001.

299. Приймак, М. В., Маєвський, О. В., Мацюк, О. В., & Шимчук, Г. В.. Моделі та інформаційні технології дослідження стохастично періодичних потоків. Lviv Polytechnic National University Institutional Repository, 2015. URL: http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb

300. Мосьпан Н. В. Формування стратегій автотранспортних підприємств по обслуговуванню разових замовлень на перевезення вантажів у міжміському сполученні. Дис. … канд. техн. наук 05.22.01. / Нац. б-ка України ім. В.І. Вернадського. Київ, 2018. 276 с.

301. Бабушкін Г.Ф., Кузькін О.Ф. Оперативно-календарне планування доставки дрібнопартіонних вантажів в умовах металургійного виробництва. *Вісник центрального наукового центру транспортної академії України*. Київ, 2000. №3. С. 48-50.

302. Лазарев А.А., Мусатова Е.Г., Гафаров Е.Р., Кварацхелия А.Г. Теория расписаний. *Задачи железнодорожного планирования*. Научное издание. Москва. ИПУ РАН, 2012. 92 с.

303. Qu T. Luo, Cao H., Fang N., Zhong J., Pang RY., Qiu ALY., Huang X., RFID-enabled just-in-time logistics management system for 'SHIP' - supply Hub in industrial park. *The 42nd International Conference on Computers and Industrial Engineering* (CIE42). (Cape Town. South Africa. 15-18 July. 2012). In CIE42 Proceedings, 2012. v. 1. p. 263-1-263-19

304. Лісовиченко О. Розробка об’єктно-орієнтованого середовища моделювання матеріальних потоків гнучкої виробничної системи. Дис. … канд. техн. наук. Нац. б-ка України ім. В.І. Вернадського. Київ, 2007. 236 с.

305. Калиниченко А. П. Разработка графиков совместной работы грузовых автомобилей и погрузочно-разгрузочных механизмов при оперативном сменно-суточном планировании. *Вісник Харківського університету.* Харків, 2001. № 506. Частина 1. С. 275-277.

306. Kuzminskyj R. Stukalets I., Tatomyr A. The algorithm of modeling of receipt and service of orders processes with account of the necessity for compliance with warranty duration of repair. TEKA. *Commission of motorization and energetics in Agriculture*, 2015. Vol. 15, No. 2. pp. 89-94

307. Chang Y., Makatsoris H. Supply chain modeling using simulation. *I. J. of SIMULATION*, 2009. Vol. 2, № 1. URL : http://scholar.google.com.ua

308. Максишко Н. К. Моделювання економіки методами дискретної нелінійної динаміки :монография / наук. ред. проф. В.О. Перепелиця. Запоріжжя. Поліграф, 2009. 416 с.

309. Petersen E. R., Fullerton H.V. The Railcar Network Models. *Candian Institute of Guided Ground Transport*, 1975. Report No. 75–11.

310. Давыдов Э. Г. Исследование операций: Учеб. пособие для студентов вузов. Москва. Высш. шк, 1990. 383 с.

311. Приймак М.В. Основи теорії моделювання, аналізу і прогнозу в автоматизованих системах управління ритмічними процесами: Автореф. дис. … докт. техн. наук: 05.13.06. Київ: НАУ, 2001. 34 с.

312. Пилипенко Ю. В., Прокудін Г. С., Ремех І. О., Чупайленко О. А. Особливості моделювання вантажних перевезень на транспортній мережі. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. Київ. НТУ, 2016. Вип. 18, ч. 1. С. 101–114.

313. Нефьодов, М. А., Потаман Н. В. Раціоналізація транспортно-технологічних схем доставки дрібнопартіонних вантажів. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2013. 5/4 (65). С.4-6.

314. Наумов В. С., Вітер Н. С. Методика формування альтернативних транспортно-технологічних систем доставки вантажів. *Математика и кибер-*

нетика – фундаментальные и прикладные аспекты Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2011. 5/4 (53). С.16-19

315. Шептура А. Н. Оптимизация размеров заказа и страхового запаса при доставке потребительских товаров. *Автомобіле - та тракторобудування. Вісник НТУ "ХПІ"*, 2004. Вып. 4. С. 154 –156.
316. Jarašūnienė1 A., Greičiūnė L. Research on the efficiency of transportation services by applying information technologies. *The 13th International Conference "Reliability and statistics in transportation and communication-2013",* 2013. p. 245-248. URL: http://www.tsi.lv/sites
317. Stock JR, DM Lambert, McGraw-Hill/Irwin. Strategic logistics management, 2001. p. 459.
318. Горяинов, А. Н. Определение экономической целесообразности работы участников логистической цепи. *Логистика. Проблемы и решения*. Харьков, 2006. №3(4). С. 31-37.
319. Власов В.М., Ефименко Д.Б., Богумил В.Н. Транспортная телематика в дорожной отрасли: учеб. пособие. Москва. МАДИ, 2013. 80 с.
320. Григоров М.А., Дащенко А.Ф., Усов А.В. Проблемы моделирования и управления движением транспортных потоков в крупных городах. Одесса. „Астропринт", 2004. 266 с.
321. Корнієнко В.І., Гусєв О.Ю., Герасіна О.В., Щокін В.П. Теорія систем керування: підручник. Дніпро. НГУ, 2017. 497 с.
322. Zhang F., Xi J., & Langari R. Real-time energy management strategy based on velocity forecasts using V2V and V2I communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016. *18*(2), 416-430.
323. Fotouhi A. B., Montazeri A. S., M. O. R. T. E. Z. A., & Jannatipour, M.. Vehicle's velocity time series prediction using neural network. *International Journal of Automotive Engineering*, 2011. 1(1), 21-28.
324. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ. Либідь, 2007. 656 с.

325. Хронусова Т. В., Асанов А. З., Назаренко М. А. Бортовые информационно-управляющие системы, обеспечивающие автоматизацию движения автомобилей в колонне на примере большегрузных автомобилей. *Кибернетика и программирование*, 2019. №2. С. 30-43. URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=21490

326. Blau J. Finns test cell phone system to monitor traffic (IDG News Service) URL: http://www.inauka.ru/experiment/article64406.html

327. I-See. Now every road is worth remembering. URL:: http://www.volvotrucks.com/trucks/uk-market/en-gb

328. Automotive News Europe E-Magazine *Audi exec takes aim at fully autonomous driving,* 2015. URL:: http://europe.autonews.com/article

329. Мокін, Б. І. Математичні моделі руху транспортних засобів, оптимальні за критерієм мінімуму витрат енергії, з урахуванням рельєфу. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, 2007. (3), 28-33.

330. Barik, B., Bhat, P. K., Oncken, J., Chen, B., Orlando, J., & Robinette, D. Optimal velocity prediction for fuel economy improvement of connected vehicles. *IET Intelligent Transport Systems*, 2018. *12*(10), 1329-1335.

331. Финаев В.И., Бутенков Д.С. Разработка интеллектуальных систем обгона и моделирование транспортных потоков. в сб. тр. Науч.сессии МИФИ, Москва, 2003, с. 164-165.

332. Кожевников В.И., Вытяжков Д.В., Толмачев В.В., Луговенко В.А., Гриценко А. А. Автоматизированная система управления дорожным движением. *Вестник Северо-Кавказского государственного технического ун-та, серия «Естественнонаучная»*. № 1(6) 110. 2007. С.110-114.

333. Förster H.J. Der Fahrzeugfurer als Bindeglied Zwischen Reifen. *Fahrwerk und Fahrbahn* VDI. Berichte, 1991. Nr. 916.

334. Фаробин Я. Е., Овчаров В. А., Кравцева В. А. Теория движения специализированного подвижного состава. Воронеж, 1981. 160 с.

335. Котиков Ю. Г., Ложкин В. Н. Транспортная энергетика. Москва. ИЦ "Академия", 2006. 272 с.

336. Заргарян Е.В., Заргарян Ю.А., Богатырев Н.С., Малышенко И.М. Разработка нечеткого контроллера, как дополнения к системе «круиз-контроль»: в сб. *Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажёров*. Пенза, 2015. С. 16-20.

337. Yoshimoto Ryuichi, Nemoto Toshinori. The impact of information and communication technology on road freight transportation the computerization of transportation: Sophisticated Systems Incorporating IT in the Mobility of People and Goods. *IATSS Research,* 2005. Vol. 29 No.1. URL: https:// www.sciencedirect.com/science/article/pii/S038611121460114X

338. Пасічник І. Ю., Фартушняк О.В., Цибулько Д.І. Формування системи автоматичного управління конкурентоспроможністю продукції. *Радіоелектроніка та інформатика*, 2013. № 1(60). С. 45–52.

339. SRR радар на каждый автомобиль. URL: http://autoline.com.ua/news.php?code =1106812330

340. Mozaffari L., Mozaffari A., Nasser L. Azad Vehicle speed prediction via a sliding-window time series analysis and an evolutionary least learning machine. A case study on San Francisco urban roads. *Engineering Science and Technology*, 2015. P. 1–18. URL : http://dx.doi.org/10.1016.

341. First demonstration of SARTRE vehicle platooning. Press release. Jan. 2011. URL: www.SARTRE-project.eu.

342. Фальфушинский В. В. Решение транспортных задач на кластерных системах. *Искусственный интеллект,* 2005. №.12 С. 63–68.

343. Філіппов, В. В., Смірнова, Н. В., & Леонтьєв, Д. М. Обґрунтування залежності витрати пального від дорожніх умов. *Автошляховик України*, 2015. (1-2), С. 46-49.

344. Chao, Q., Bi, H., Li, W., Mao, T., Wang, Z., Lin, M. C., & Deng, Z.. A survey on visual traffic simulation: Models, evaluations, and applications in autonomous driving: in *Computer Graphics Forum* (2020, February). Vol. 39, No. 1, pp. 287-308.

345. Harrison R. C., Rhea B. K., Ramsey A. N., Dean R. N., & Perkins J. E. A True Random Number Generator based on a Chaotic Jerk System. In *2019 Southeast Con.* (2019, April). IEEE, 2019. pp. 1-5.

346. Tadic L., Afric P., Sikic L., Kurdija A. S., Klemo V., Delac G., & Silic M.. Analysis and Comparison of Exact and Approximate Bin Packing Algorithms: In *2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO).* (2019, May) IEEE, 2019. pp. 919-924.

347. Мокін Б. І. Математичні моделі руху транспортних засобів, оптимальні за критерієм мінімуму витрат енергії, з урахуванням рельєфу. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, 2007. № 3. С. 28-33.

348. Баранов Г. Л. Міронова В. Л. & Прохоренко О. М. Оптимізація траєкторного управління та безпеки руху об'єктів наземних транспортних засобів на базі структурного аналізу складних динамічних систем. *Управління проектами, системний аналіз і логістика,* 2013. № 12. С. 7-16.

349. Udin U., Pashentsev S., Petrov S. Using Pontryagin maximum principle for parametrical identification of ship maneuvering mathematical model. *Transport problems,* 2014. Vol. 9. Issue 2. URL: http://transportproblems.polsl.pl

350. Понтрягин Л. С. Принцип максимума в оптимальном управлении. Москва. Едиториал УРСС, 2004. 64 с.

351. ДБН В.2.3-4:2007. Автомобільні дороги. Частина І. Частина ІІ. URL: http://dbn.at.ua

352. Liudvinavičius Lionginas, Lingaitis P. L. Locomotive kinetic energy management. *Transport problems*, 2011. Vol. 6. Issue 3. P. 135-142.

353. Способ Петросова для рекуперации энергии у автомобилей. Патент Российской Федерации RU2119434.

354. Kenneth J. Modeling Tools for Predicting the Impact of Rolling Resistance on Energy Usage and Fuel Efficiency for Realistic Driving Cycles. In: *Kelly*

International Tire Exhibition and Conference, 2002. URL: http://citeseerx.ist.psu.edu.

ДОДАТКИ

Додаток А Імітаційне моделювання виконання замовлень

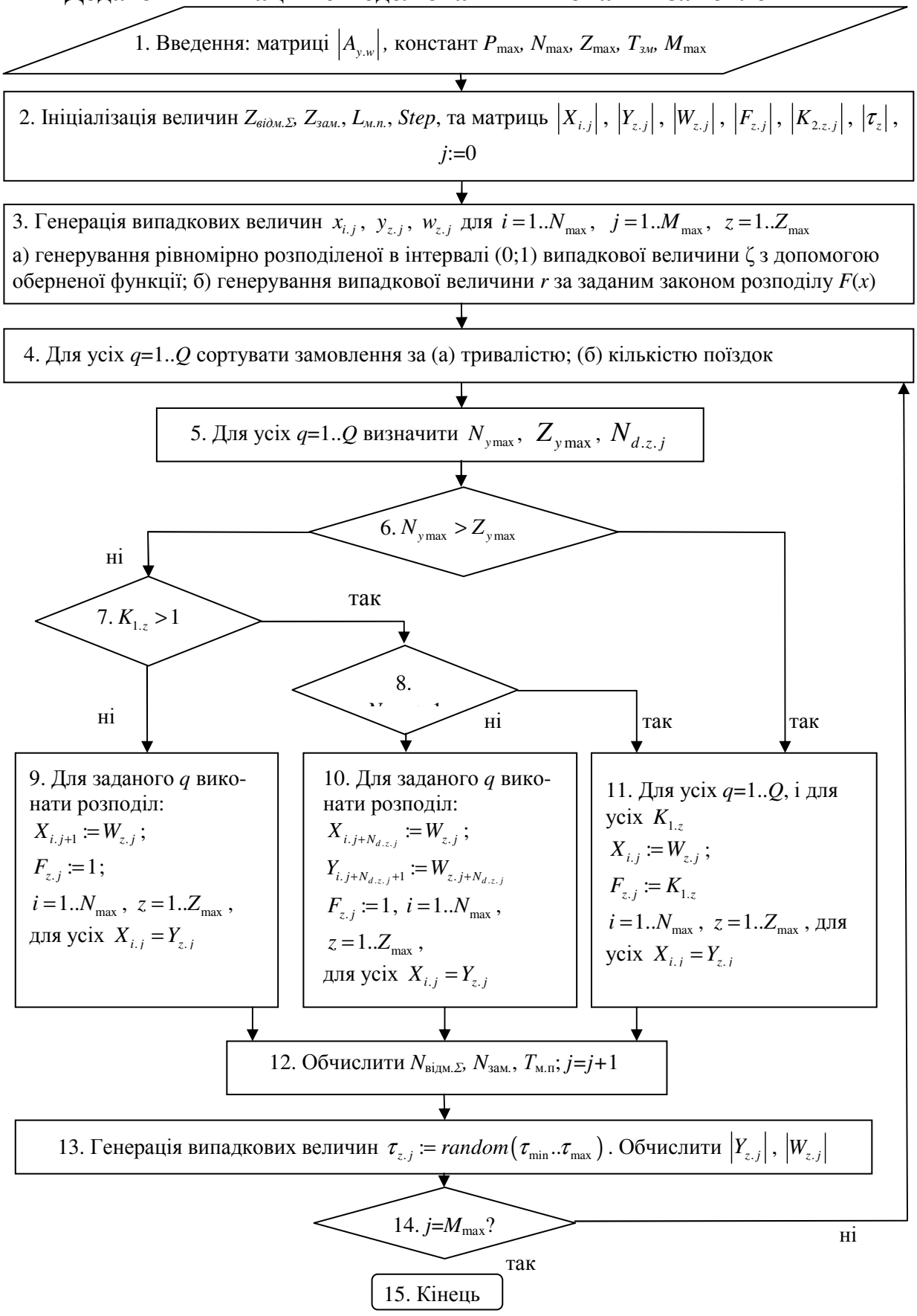


Рисунок А.1 – Блок-схема алгоритму імітаційного моделювання при випадковій періодичності надходження замовлень на перевезення вантажів

Лістинг програми імітаційного моделювання на мові Делфі 7

```
unit Imitation14;
  //програма виконує імітацію міжміських перевезень при випадковому вхідному
  // потоку при тому, що замовлення виконуються, якщо є вільний транспорт
  //Якщо автомобіль виконав замовлення в заданому пункті, а нових немає, то
  //він прямує до найближчого пункту, де є замовлення і буде там впродовж
  // наступного періоду
  //Частковий роздрук результатів
interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, Math;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Start: TButton;
    procedure ButtonClick1(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
const
  Pmax = 62;   // максимальна кількість замовлень в одному пункті
  Nmax = 60;   //максимальна кількість автомобілів
  Mmax = 100;   //кількість кроків моделювання
  Qmax = 17;    //кількість транспортних пунктів
  Zmax = 70;   //кількість замовлень максимальна
  Tn   = 10;     //тривалість зміни максимальна
  File1 = 'D:\Delphi\Imit\Data1.txt';
  File2 = 'D:\Delphi\Imit\04\Result27.txt';
                       taumax = 40;      //максимальна періодичність замовлення
                        taumin = 4;        //мінімальна періодичність замовлення

var
  Form1: TForm1;
  Xij           : array[1..Nmax, 0..Mmax] of integer;
  Yzj, Wzj      : array[0..Zmax, 0..Mmax] of integer;
  TauZ          : array[1..Zmax] of integer;
  Ayw           : array [1..Qmax,1..Qmax] of real;
  K1            : array[1..Zmax] of integer;
  K2            : array[1..Zmax,1..Mmax] of integer;
  Zw            : array[1..Zmax] of integer;            //часові вікна
  YF            : array[1..Zmax,0..Mmax] of integer;    //змінна призначення
  SortTime,
  SortGeneral              : array[0..Pmax] of integer;
  MaxTime                  : array[1..Pmax] of real;
  OrderSet, OrderSetDouble : set of byte;
  MaxTrips                 : array[1..Pmax] of byte;
  SortTrips                : array[1..Pmax,1..Pmax] of byte;
  OrderSet2,
  OrderSet2Double,Set2     : set of byte;
  OrdersSorted             : array [1..Qmax,1..Pmax] of byte;
  step, k1sum              : integer;
  Tmax , Taver, Taverstop  : real;
  idleRun, SumIdleRun, AverIdleRun   : real;
  F1,F2           : textfile;
  i,j,n,m,q,k,z,jk,zk,ks, zn   : integer;
  Ny, My,C,Nymax,Mymax,ZnewTotal,
              rejection,rejectionsum, totalincome  : integer;

procedure ReadData;
procedure Init;
procedure ImitationStep;
function OrdersCalculate(var Y, JJ: integer): integer;
function VehiclesCalculate( var Y, JJ: integer): integer;
Procedure OrderSortI (var YP, jj : integer);
Procedure OrderSortII(var YP2, jj : integer);
```

```
Procedure Sorting (var ki : integer);
Procedure NumberOfDays (zz, jj : integer);
procedure AppoitmentA (zz, ii, jj : integer);
procedure AppoitmentB (var zz, xx, jj : integer);
procedure NexStepsInit;
procedure NexStepsInit2;
Procedure OutPrint;
procedure mainBody(var step : integer) ;
procedure TravelToNearest;
function NearestPoint (var ij : integer) : Integer;
implementation
{$R *.dfm}

//*************************************************************************
Procedure ReadData;
  begin
   while not eof(F1) do
    begin
      read(F1, i, j, Ayw[i,j]);
      Ayw[j,i]:=Ayw[i,j]
    end;
  end;
 //*************************************************************************

Procedure Init;
//занулює початкові масиви
//генерує випадкові початкові дані
var kr : Integer;
label M1;
 begin
  rejectionsum :=0;
  totalincome:=0;
  SumIdleRun:=0;
  K1sum:=0;
  Taver:=0;
  ZnewTotal:=0;
  step:=0;
  Randomize;
  for i := 1 to Nmax do
    for j := 0 to Mmax do
       Xij[i,j]:=0;
  for z := 1 to Zmax do
    begin
     k1[z]:=0; TauZ[z]:=0;
     for j := 0 to Mmax do
        begin
          Yzj[z,j]:=0;
          Wzj[z,j]:=0;
          k2 [z,j]:=0;
          YF [z,j]:=0
        end;
    end;

  //writeln(f2,'Початковий і кінцевий пункти замовлення');

 for z := 0 to Zmax do
   begin
      //Randomize;
      Yzj[z,0]:=Randomrange(0,Qmax);
      //Randomize;
      Wzj[z,0]:=Randomrange(0,Qmax);
   M1: if (Wzj[z,0]=Yzj[z,0]) then
        begin
            //randomize;
            Wzj[z,0]:=Randomrange(0,Qmax);
            goto   M1
        end;
     //writeln(f2,'замовлення№',z,' початок-',Yzj[z,0],' кінець-',Wzj[z,0])
   end;
   //якщо автомобіль знаходить в АТП, то Xij=0
   //в іншому випадку призначається його випадкова координата
```

```
   for i := 1 to Nmax do
    begin
     //Randomize;
     Xij[i,0]:=randomrange(1,Qmax);
    end;

   for z := 1 to Zmax do
     begin
        K1[z]:= randomrange(1,4);
        if Yzj[z,0]=0 then
           K1[z]:=0;
           if k1[z]>0 then
             //writeln(f2,'кількість поїздок замовлення ',z,' - ',k1[z]);
     end;
   for z := 1 to Zmax do
      //часові вікна
       begin
          ZW[z]:=RandomRange(1,3);
          if Yzj[z,j]=0 then
             ZW[Z]:=0;
       end;
    {for z := 1 to Zmax do
       begin
         TauZ[z]:=Randomrange(taumin,taumax);     //яка змінюється від кроку до кроку
       end; }
   {for  z:=1 to Zmax do
    for kr:=1 to Mmax do
      if (tauZ[z]*kr)<=Mmax then
       if Yzj[z,(tauZ[z]*kr)]=0 then
        begin
          Yzj[z,(tauZ[z]*kr)]:= Yzj[z,0];
          Wzj[z,(tauZ[z]*kr)]:= Wzj[z,0];
        end; }
 end;


//*****************************************************************
 //функція обчислює кількість нерозподілених заявок на поїздки,

 // є у Y-му пункті на JJ-му кроці
function OrdersCalculate( var Y, JJ: integer): integer;
 var zz, OC : integer;
  begin
    OC:=0;
    for zz := 1 to Zmax do
      if ((Yzj[zz,JJ] = Y) and (Y>0) and (YF[zz,jj]=0)) then
        OC:= OC+1;
    OrdersCalculate:= OC
  end;

//*****************************************************************
//функція обчилює кількість вільних автомобілів, які є в Y-му пункті на JJ-му кроці
//і усі вони вільні

 function VehiclesCalculate( var Y, JJ: integer): integer;
 var ii, VC : integer;
  begin
    VC:=0;
    for ii := 1 to Nmax do
      if ((Xij[ii,JJ]=Y) and (Xij[ii,JJ+1]=0)) then
        VC:=VC+1;
    VehiclesCalculate:=VC
  end;


//*****************************************************************
// Сортування невиконаних в Y-му пункті замовлень за максимальною тривалістю
```

```
Procedure OrderSortI (var YP, jj : integer);
  var Amax    : real;
      ii,qq,vv,zx   : byte;
      Set1          : set of byte;
  begin
    QQ:=YP;
    vv:=jj;
    set1:=[];
    OrderSet:=[];
    OrderSetDouble:=[];
    for ii := 1 to Zmax do
      if Yzj[ii,vv] = QQ then
         begin
            OrderSet:=OrderSet+[ii];
            OrderSetDouble:=OrderSetDouble + [ii];
         end;
    for ii := 1 to Pmax do
      begin
         MaxTime[ii]:=0;
         SortTime[ii]:=0;
         SortGeneral[ii]:=0;
      end;
    for ii := 1 to Pmax do
     begin
      for zx := 1 to ii-1 do
         Set1:=Set1+[SortTime[zx]];
          OrderSet:=OrderSetDouble-Set1;
      Amax:=0;
      for z:=1 to Zmax do
       if (z in OrderSet) and (Amax < Ayw[Yzj[z,jj],Wzj[z,jj]]) then
        begin
           Amax := Ayw[Yzj[z,jj],Wzj[z,jj]];
           SortTime[ii]:=z;
           MaxTime[ii]:= Amax;
           OrderSet:=OrderSet-[SortTime[ii]];
        end;
     end;
  end;

//*****************************************************************

 //процедура сортує попередньо відсортований масив замовлень в одному пункті YP2
 // на jj-му кроці імітації за максимальною кількістю поїздок з вантажем

 Procedure OrderSortII(var YP2, jj : integer);
  label      M2;
  var ii, iii, xx, ww, YYp, KA ,wx,wwx        : integer;
      Kmax                                    : real;
   Begin
     YYp:=jj;
     YYp:=Yp2;
     OrderSet2:=[];
     for ii := 1 to Pmax do
       begin
          SortGeneral[ii]:=0;
          MaxTrips[ii]:=0;
          for iii := 1 to Pmax do
             SortTrips[iii,ii]:=0;
       end;
      iii:=1;
      ii:=1;
      xx:=1;
      SortTrips[1,1]:=SortTime[1];
      for xx:=1 to Pmax do
        begin
         if MaxTime[xx]=MaxTime[xx+1] then
           begin
             iii:=iii+1;
             SortTrips[ii,iii]:=SortTime[xx+1];
           end
             else
```

```
          begin
            ii:=ii+1;
            iii:=1;
            SortTrips[ii,iii]:=SortTime[xx+1];
          end;
        end;
        for ii := 1 to Pmax do
          Sorting(ii);
        xx:=0;
        for ii := 1 to Pmax do
           for iii := 1 to Pmax do
         begin
           if SortTrips[ii,iii] <>0 then
            begin
               xx:=xx+1;
               SortGeneral[xx]:=SortTrips[ii,iii];
            end;
         end;
   End;


//*****************************************************************************

Procedure Sorting (var ki : integer);
  var iz, zz, kz, zs : byte;
      KKmax          : byte;
      OrderSet2Double : set of byte;
      K1max           : array[1..Pmax] of integer;
  begin
    KKmax:=0;
    zz:=0;
    for iz := 1 to Pmax do
     begin
      K1max[iz]:=0;
      if  (SortTrips[ki,iz] >0) then
         OrderSet2:= OrderSet2 + [SortTrips[ki,iz]];
     end;
    OrderSet2Double:=OrderSet2;
    for kz := 1 to Pmax do
      for iz := 1 to Pmax do
       if ((SortTrips[ki,iz]) in (OrderSet2)) then
         begin
           if K1[SortTrips[ki,iz]] > KKmax then
             begin
               KKmax:= K1[SortTrips[ki,iz]];
               zz:= iz;
               K1max[kz]:= SortTrips[ki,iz]
             end;
         end;
     for iz := 1 to Pmax do
       SortTrips[ki,iz]:= K1max[iz]
   end;

//*****************************************************************************

//перший крок імітації, на якому автомобілі сортуються за двома критеріями


procedure ImitationStep;
 var qq,Mymax,min : integer;
     ProportionZX : array [1..Zmax] of boolean;
     VCY,iqq,iz : integer;
  begin
   for q:=1 to Qmax do
    for z:=1 to Pmax do
     OrdersSorted[q,z]:=0;
   j:=step; VCY:=0; min:=0; rejection:=0; ZnewTotal:=0;
   for z:=1 to Zmax do
    if ((Yzj[z,j]>0) and (wzj[z,j]>0)) then
      ZnewTotal:= ZnewTotal+1;
   //сортуємо замовлення у пунктах
```

```
   //Writeln(f2,'Розподіл замовлень по пунктах');
    for q := 1 to Qmax do
      begin
        //write(f2,'Пункт ',q,') ');
        OrderSortI(q,j);
        OrderSortII(q,j);
        for z := 1 to Pmax do
         begin
          if SortGeneral[z]>0 then
           begin
            OrdersSorted[q,z]:= SortGeneral[z];
            //write(F2,SortGeneral[z],' ');
           end;
         end;
         //writeln(f2);
      end;


   //визначаємо  варіант співвідношення кількості автомобілів і замовлень
   // в кожному пункті
    Ny:=0;   My:=0;  Mymax:=0; Nymax:=0;
    for q:=1 to Qmax do
     ProportionZX[q]:=true;
    for q:= 1 to Qmax do
      begin
        Ny:= OrdersCalculate(q,j);
        Nymax:=Nymax+OrdersCalculate(q,j);
        My:= VehiclesCalculate(q,j);
        Mymax:=Mymax+VehiclesCalculate(q,j);
         if OrdersCalculate(q,j)>VehiclesCalculate(q,j) then
           min:=min+VehiclesCalculate(q,j)
            else
              min:=min+OrdersCalculate(q,j);
         if Ny<My then
          begin
            ProportionZX[q]:= false;
            //writeln(f2,'в пункті ',q,' автомобілів-',My,' замовлень-',Ny,' автомобі-
лів більше');
          end else
          //writeln(f2,'в пункті ',q,' автомобілів-',My,' замовлень-',Ny,' автомобілів
не більше');
       end;
     writeln(f2,{'Надійшло нових замовлень -                        ',}ZnewTotal);
     totalincome:=totalincome+ ZnewTotal;
     writeln(f2,{'Кількість вільних автомобілів на початку циклу    ',}Mymax);
     writeln(f2,{'Замовлення,які можна прийняти до виконання -      ',}min);

      zn:=0;
    // Варіант А. Перший розподіл автомобілів, якщо їх є менше, ніж замовлень
   for q := 1 to Qmax do
     if (ProportionZX[q]) then
       begin
         for i := 1 to Nmax do
          for iz:= 1 to Zmax do
           if ((Yzj[OrdersSorted[q,iz],j]>0) and
               (Xij[i,j]>0) and
                (Xij[i,j+1]=0) and
                 (Xij[i,j]=Yzj[OrdersSorted[q,iz],j])) then
                 begin
                   zn:=OrdersSorted[q,iz];
                   if zn>0 then
                   AppoitmentA(zn,i,j)
                 end;
       end;



         //***************************
```

```
    for q := 1 to Qmax do
      if (ProportionZX[q]=false) then
   // Варіант В. Інший розподіл автомобілів, якщо їх є більше, ніж замовлень
      begin
       for i := 1 to Nmax do
        for iz:= 1 to Zmax do
        begin
         if ((Yzj[OrdersSorted[q,iz],j]>0) and
            (Wzj[OrdersSorted[q,iz],j]>0) and
            (Xij[i,j]>0) and (Xij[i,j+1]=0) and
            (Xij[i,j]=Yzj[OrdersSorted[q,iz],j])) then
                    begin
                      zn:=OrdersSorted[q,iz];
                      if zn>0 then
                      AppoitmentB(zn,i,j);
                    end;
        end
      End;
  end;

//*****************************************************************************


//процедура А призначення автомобілів на виконання замовлення zz пункті q,
//якщо автомобілів є менше
procedure AppoitmentA (zz, ii, jj: integer);
  var kj, kzz, kjj, kii, KIZ, numofdays : integer;
  begin
    kzz:=zz;
    kjj:=jj;
    kii:=ii;
    NumberOfDays(kzz,kjj);
    numofdays:=ks;
    if ((Yzj[kzz,kjj]>0) and              //якщо замовлення реальне
       (Wzj[kzz,kjj]>0) and
       (Xij[kii,kjj+1]=0) and        //якщо автомобіль ще не призначений
       (Yf[kzz,kjj]=0) and           //якщо замовлення ще не розподілене
         (numofdays=1)) then         //якщо замовлення виконується за одну
         begin                       //зміну
            Xij[kii,j+1]:= Wzj[kzz,kjj];      //призначення  авто
            YF[kzz,kjj]:=1;
            //writeln(f2,'Замовлення №', kzz,'; кількість змін - ', ks, '; поїздок
виконано - ',k1[kzz]);
            //writeln(f2,'Маршрут автомобіля ',kii ,' є ',Yzj[kzz,kjj],' -
',Wzj[kzz,kjj]);
            K1sum:=k1sum+k1[kzz];
         end
            else                  //якщо кількість періодів виконання
                                  //замовлення, є більш, ніж ніж один
         begin
           //YF[kzz,kjj]:=ks;
           SetRoundMode(rmUp);
           KIZ:=round(k1[kzz]/ks);   //кількість змін, за які можна виконати
                                     //усі поїздки замовлення послідовно
             for kj:=(kjj) to (kjj+ks) do
                begin
                  Yzj[kzz,kj+1]:= Wzj[kzz,kj];
                  Wzj[kzz,kj+1]:= Yzj[kzz,kj];
                  YF[kzz,kj]:= 1;
                  Xij[kii,kj+1]:= Wzj[kzz,kjj];
                end;
             //writeln(f2,'Замовлення №', kzz,'; кількість змін - ', ks, '; поїздок
виконано - ',KIZ);
             //write(f2,'Маршрут автомобіля ',kii,' є ');
             if Yzj[kzz,kjj]>0 then
             begin
               //write(f2, Yzj[kzz,kjj]);
               for kj := kjj to (kjj+k1[kzz]) do
                 if Wzj[kzz,kj]>0 then
                   //write(f2,' - ',Wzj[kzz,kj]);
               //writeln(f2);
```

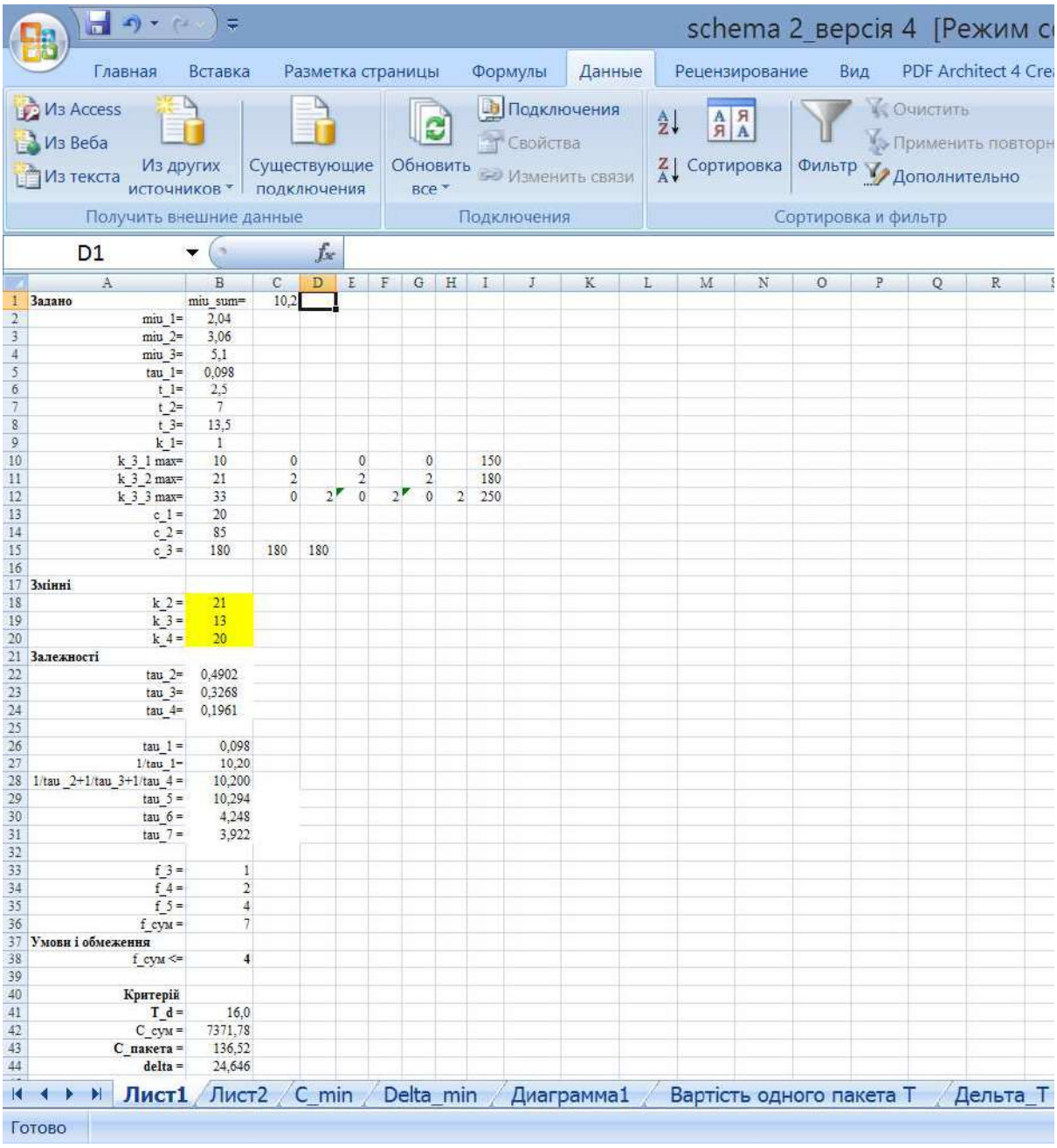
```
            end;
         end;
  end;
//*****************************************************************************
//процедура В призначення автомобілів на виконання замовлень в zz пункті,
//якщо автомобілів є більше, ніж замовлень, то усі автомобілі призначаються
//на задані замовлення і на кожну поїздку, якщо їх є більше, ніж одна

procedure AppoitmentB (var zz, xx, jj : integer);
  var kj, Bzz, Bxx, Bjj, kk1 : integer;

  begin
    Bzz:=zz; Bxx:=xx; Bjj:=jj; kk1:=k1[bzz];
    NumberOfDays(Bzz,Bjj);
    //if (ks>1) then
     begin
       begin
          if ((Yzj[Bzz,Bjj]=Xij[Bxx,Bjj]) and   //якщо автомобіль є в пункті Yzj
           (Xij[Bxx,Bjj+1]=0) and            //ящо автомобіль ще не призначений
           (Yf[Bzz,Bjj]=0) and         //Якщо замовлення ще не розподілено
           (YF[Bzz,Bjj]<=K1[Bzz])) then
            begin
              //writeln(f2,'Замовлення №', bzz,'; змін - ', ks, '; поїздок заплановано
- ',k1[bzz]);
              //write(f2,'Маршрут автомобіля ',Bxx,' є ');
              Xij[Bxx,Bjj]:=Wzj[Bzz,Bjj];
              YF[Bzz,Bjj]:=YF[Bzz,Bjj]+1;
              Yzj[Bzz,Bjj+1]:= Wzj[Bzz,Bjj];
              //writeln(f2,' ',Yzj[Bzz,Bjj],' - ',Wzj[Bzz,Bjj]);
            end;
       end;
     end;
    SetRoundMode(rmUp);
    k1sum:=k1sum + round(kk1/ks);{[bzz]};
  end;


  //*****************************************************************************


  //обчислює кількість періодів, за які має бути виконане замовлення z, починаючи
//з періоду jj



procedure NumberOfDays (zz, jj : integer);
  var kj, zkz  : integer;
      zzk      : real;
  begin
      zkz:=zz;
      kj:=jj;
      if K1[zkz]>1 then
       begin
         zzk:= 2*K1[zkz]*(Ayw[Yzj[zkz,kj],Wzj[zkz,kj]])/Tn;
         SetRoundMode(rmUp);
         ks:=Round(zzk)
       end
         else
       begin
           zzk:=(Ayw[Yzj[zkz,kj],Wzj[zkz,kj]])/Tn;
           SetRoundMode(rmUp);
           ks:=Round(zzk)
       end;
  end;



//*****************************************************************************
```

```
  Procedure NexStepsInit;
  //Циклічні кроки моделювання з періодичним поновленням замовлень
  Begin
    K1sum:=0;
                              //Якщо замовлення не виконане на jn-1 кроці і
    for z := 1 to Zmax do     //часове вікно дозволяє його виконати далі,
     if (Yzj[z,j-1]>0) and (Yf[z,j-1]=0) then  //то замовлення активізується
       if Yzj[z,j]=0 then
        if ZW[z]>1 then
          begin
            Yzj[z,j]:=Yzj[z,j-1];
            Wzj[z,j]:=Wzj[z,j-1];
          end;
  End;
 //*****************************************************************************
 procedure NexStepsInit2;
 var zzz,jj : integer;
  //якщо замовлення виконувалось на попередньому кроці і виконане дотепер
  //то активізувати його за випадковою періодичністю
  Begin                                 //яка змінюється від кроку до кроку
   Randomize;
   for zzz := 1 to Zmax do              //випадково
    begin
    if (Yf[zzz,0]>0) then
      TauZ[zzz]:=Randomrange(taumin,taumax);
       for jj:=1 to Mmax do
         if (Yzj[zzz,(jj*tauZ[zzz])]=0) then
          begin
           Yzj[zzz,(jj*tauZ[zzz])]:= Yzj[zzz,0];
           Wzj[zzz,(jj*tauZ[zzz])]:= Wzj[zzz,0]
          end;
    end;
  End;


//*****************************************************************************


Procedure OutPrint;
//друкує проміжні результати
 var isum, zsum, kssum : integer;
     Tstop : real;
     Tmov  : Real;
  begin
    isum:=0;
    K1sum:=0;
    rejection:=0;
    Tmax:=0;
    for i := 1 to Nmax do
     if (Xij[i,j]>0) and (Xij[i,j+1]>0) then
       isum:=isum+1;
     writeln(f2,{'Кількість задіяних автомобілів-                  ',}isum);
    zsum:=0;
    for z := 1 to Zmax do
     if Yf[z,j]>0 then
      begin
       Zsum:=Zsum+1;
       K1sum:=K1sum+Yf[z,j];
       Tmax:=Tmax+Yf[z,j]*Ayw[Yzj[z,j],Wzj[z,j]]
      end;
       Tstop:=Nmax*Tn-Tmax;
       writeln(f2,{'Кількість замовлень, які виконуються -           ',}Zsum);
       writeln(f2,{'Кількість виконаних поїздок -                    ',}K1sum);
    rejection:=  ZnewTotal-Zsum;
    if rejection<0 then
      rejection:=0;
       writeln(f2,{'Кількість відмовлених замовлень -                ',} rejection);
    rejectionsum:=rejectionsum +  rejection;
       writeln(f2,{'Тривалість поїздок з вантажем -                  ',} Tmax:2:1{,'
год.'});
```

```
       writeln(f2,{'Тривалість простоїв -                              ',} Tstop:2:1{,'
год.'});
    Taver:= Taver+Tmax;
    Taverstop:=Taverstop+Tstop;
    TravelToNearest;
       Writeln(f2,{'Тривалість марного пробігу автомобілів
',}IdleRun:2:1{,' год'});
    SumIdleRun:=SumIdleRun+IdleRun;
  end;
//*****************************************************************************
  procedure mainBody(var step : integer);
   var stepJ : integer;
   begin
      begin
        j:=step;
        writeln(f2,'*********************************************');
        writeln(f2,'Крок №',j);
        Tmax:=0;
        NexStepsInit;
        NexStepsInit2;
        ImitationStep;
       end;
   end;
//*****************************************************************************
function NearestPoint (var ij : integer) : Integer;
 var ShortWay : Real;
     point,minpoint : Integer;
     Zpoint         : set of byte;
     zz : integer;
// Процедура визначає найближчий пункт від місця розташування автомобіля, де
// є вантаж для відправлення
begin
  shortWay:=0;
  minpoint:=0;
  Zpoint:=[];
  for zz:=1 to Zmax do
   if ((Yf[zz,j]=0) and (ZW[zz]>1)) then
    Zpoint:=Zpoint+[zz];
  for point:=1 to Qmax do
   if (Yzj[point,j] in Zpoint) then
    if Ayw[ij,point]>ShortWay then
     if (ij <>point) then
     begin
      ShortWay:= Ayw[ij,point];
      minpoint:=point
     end;
  NearestPoint:=minpoint;
end;
//*****************************************************************************
procedure TravelToNearest;
var vi     : integer;

begin
  idleRun :=0;
  for vi:=1 to Nmax do
   if Xij[vi,j+1]=0 then
     for z:=1 to Zmax do
      if Yzj[z,j]=NearestPoint(vi) then
       if Yzj[z,j]>0 then
       begin
        Xij[vi,j+1]:= NearestPoint(vi);
        idleRun := idleRun + Ayw[Xij[vi,j],Xij[vi,j+1]]
       end;
end;

//*****************************************************************************
procedure TForm1.ButtonClick1(Sender: TObject);
begin
 AssignFile(F1,File1);
  Reset(F1);
  AssignFile(F2,File2);
```

```
  Rewrite(F2);
  Writeln(f2,'Застосовано правило, за яким авто не виконує марних пробігів, а');
  Writeln(f2,'залишається в пункті останнього розвантаження');
  Writeln(f2,'Максимальна кількість автомобілів -    ', Nmax);
  Writeln(f2,'Кількість кроків моделювання -         ', Mmax);
  Writeln(f2,'кількість транспортних пунктів -       ', Qmax);
  Writeln(f2,'кількість замовлень максимальна -      ', Zmax);
  Writeln(f2,'тривалість зміни максимальна -         ', Tn);
  Writeln(f2,'максимальна періодичність замовлень  - ', taumax,' діб');
  Writeln(f2,'мінімальна періодичність замовлень  -  ', taumin,' діб');
  Writeln(f2,'*********************************************');
  ReadData;
  Init;
  writeln(f2,'Крок №0');
  ImitationStep;
  OutPrint;
  for step := 1 to Mmax do
   begin
    MainBody(step);
    OutPrint;
   end;
  Writeln(f2,'************************************************************');
  Writeln(f2,{'Сумарна тривалість поїздок з вантажем за цикл, год. - ', }taver:2:1);
  Writeln(f2,{'Сумарна тривалість простою транспорту за цикл, год. - ',
}taverstop:2:1);
  Taver:=Taver/Mmax;
  Taverstop:=Taverstop/Mmax;
  Writeln(f2,{'Середня тривалість поїздок з вантажем за цикл, год. - ', }taver:2:1);
  Writeln(f2,{'Середня тривалість простою транспорту за цикл, год. - ',
}taverstop:2:1);
  {for I := 1 to Qmax do
    for j := 1 to Qmax do
      writeln(f2,Ayw[i,j]);  }
  Writeln(f2,{'Загальна кількість відмов -                        ',
}rejectionsum);
  Writeln(f2,{'Загальна кількість замовлень -                     ', }totalincome);
  Writeln(f2,{'Загальна тривалість марного пробігу -              ', }SumIdleRun
:2:1);
  //Writeln(f2,'Частка відмов -                                     ',
rejection/totalincome : 2:3);
  CloseFile(F1);
  CloseFile(F2);
 Beep;
 Close;
end;

end.
```

Додаток Б Нелінійне програмування в пакеті Solver електронних таблиць Excel



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	**Задано**	miu_sum=	10,2						
2	miu_1=	2,04							
3	miu_2=	3,06							
4	miu_3=	5,1							
5	tau_1=	0,098							
6	t_1=	2,5							
7	t_2=	7							
8	t_3=	13,5							
9	k_1=	1							
10	k_3_1 max=	10	0		0		0		150
11	k_3_2 max=	21	2		2		2		180
12	k_3_3 max=	33	0	2	0	2	0	2	250
13	c_1 =	20							
14	c_2 =	85							
15	c_3 =	180	180	180					
16									
17	**Змінні**								
18	k_2 =	21							
19	k_3 =	13							
20	k_4 =	20							
21	**Залежності**								
22	tau_2=	0,4902							
23	tau_3=	0,3268							
24	tau_4=	0,1961							
25									
26	tau_1 =	0,098							
27	1/tau_1=	10,20							
28	1/tau _2+1/tau_3+1/tau_4 =	10,200							
29	tau_5 =	10,294							
30	tau_6 =	4,248							
31	tau_7 =	3,922							
32									
33	f_3 =	1							
34	f_4 =	2							
35	f_5 =	4							
36	f_сум =	7							
37	**Умови і обмеження**								
38	f_сум <=	**4**							
39									
40	**Критерій**								
41	**T_d =**	16,0							
42	C_сум =	7371,78							
43	**C_пакета =**	136,52							
44	**delta =**	24,646							

Рисунок Б.1 – Введення початкових даних для оптимізації ТС в електронних таблицях Excel

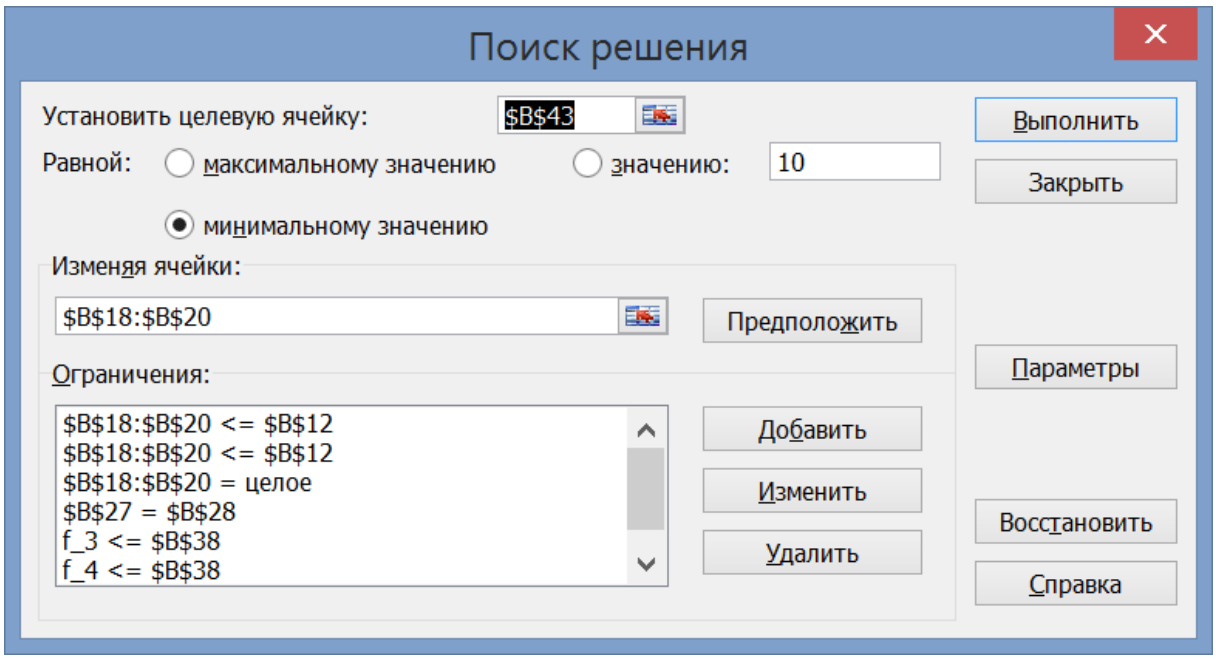


Рисунок Б.2 – Діалогове вікно програми

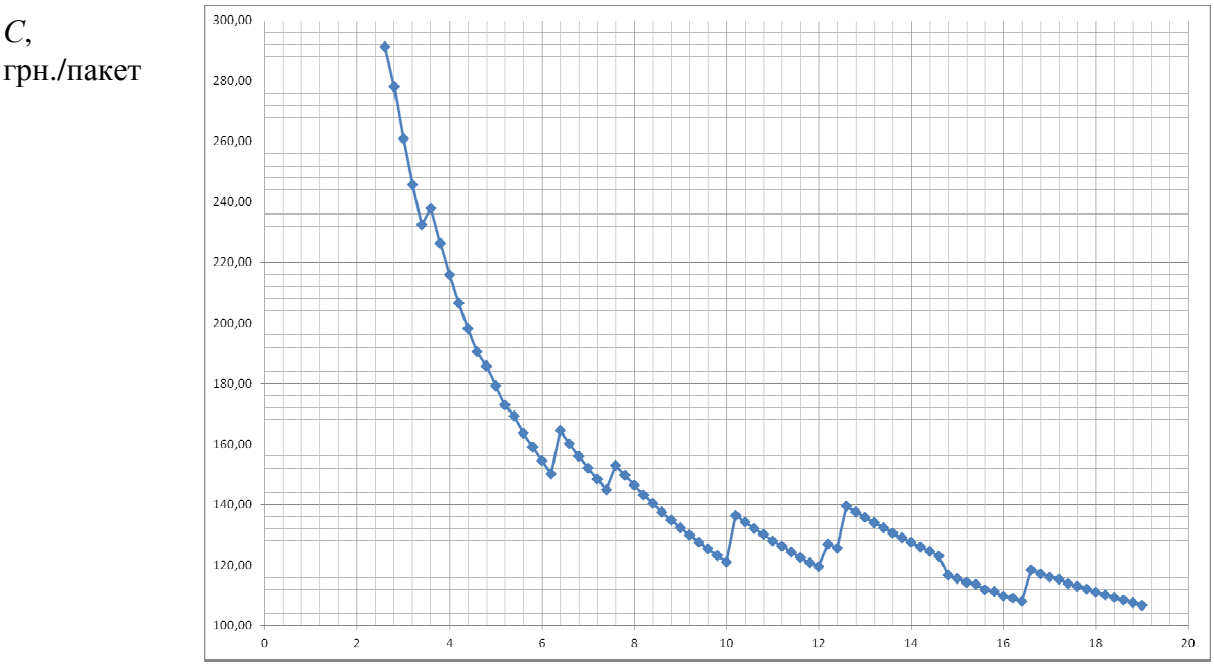


Рисунок Б.3 – Графік залежності оптимальних витрат на транспортування пакета від сумарної інтенсивності вантажопотоків в ТТС

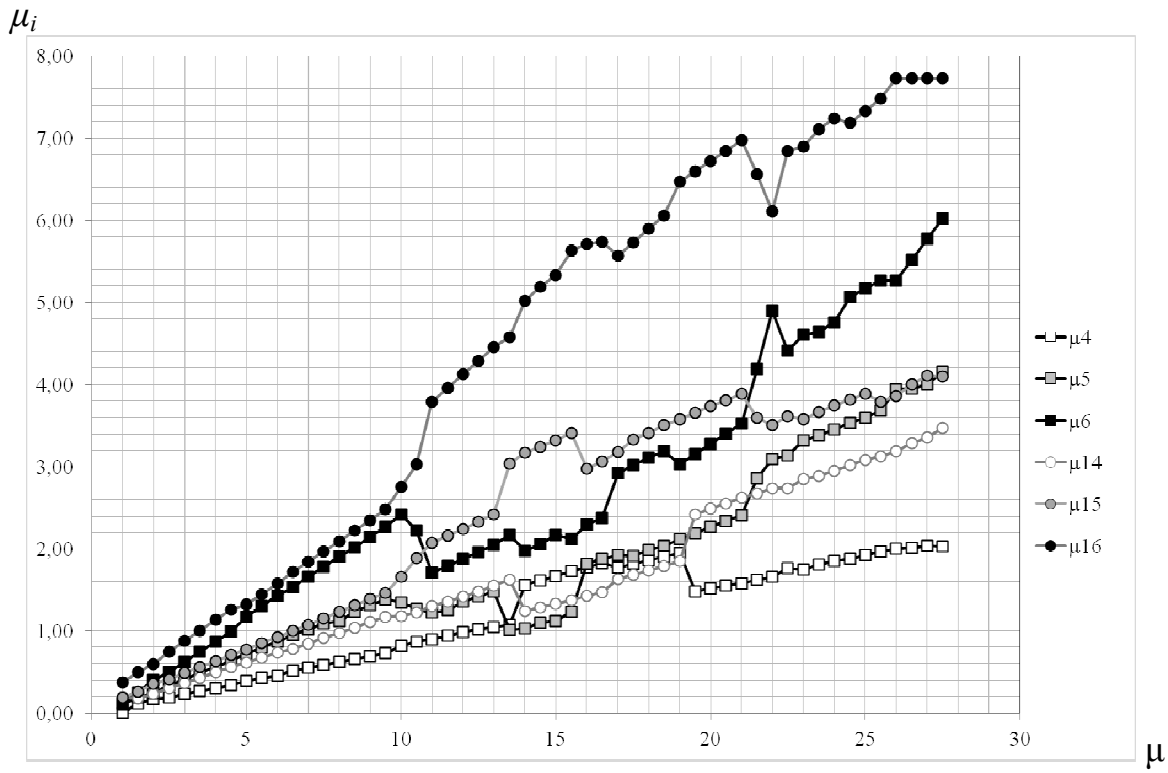


Рисунок Б.4 – Розподіл інтенсивностей окремих вантажопотоків в ТТС №3 залежно від сумарної інтенсивності вантажопотоку

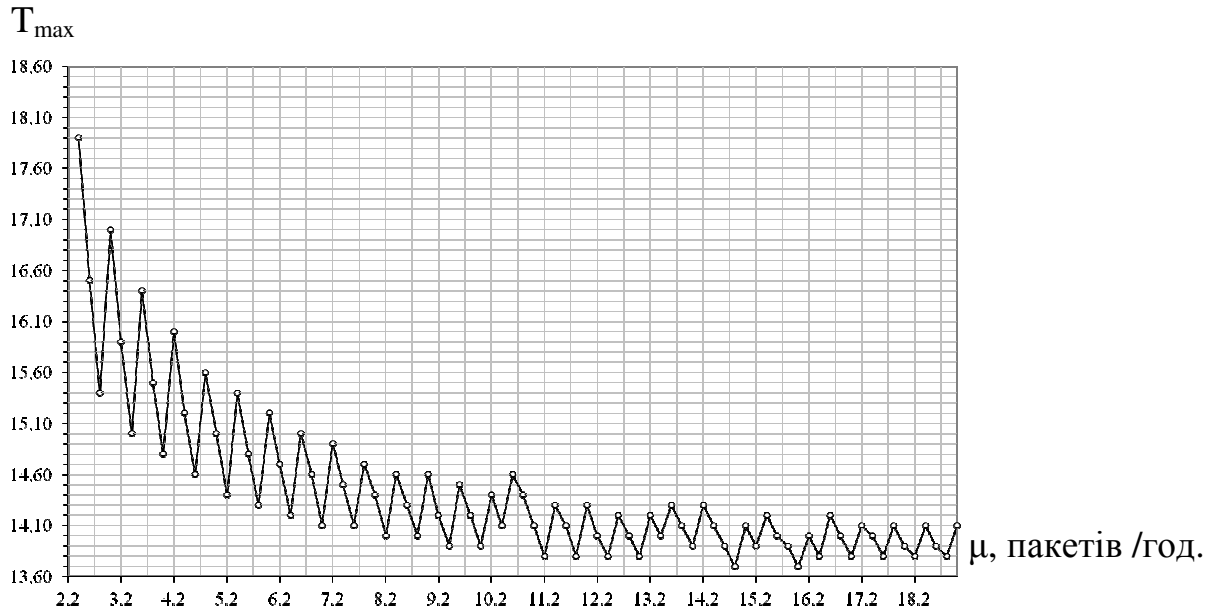


Рисунок Б.5 – Графік залежності максимальної гарантованої тривалості доставки вантажів від сумарної інтенсивності вантажопотоків в ТТС №1

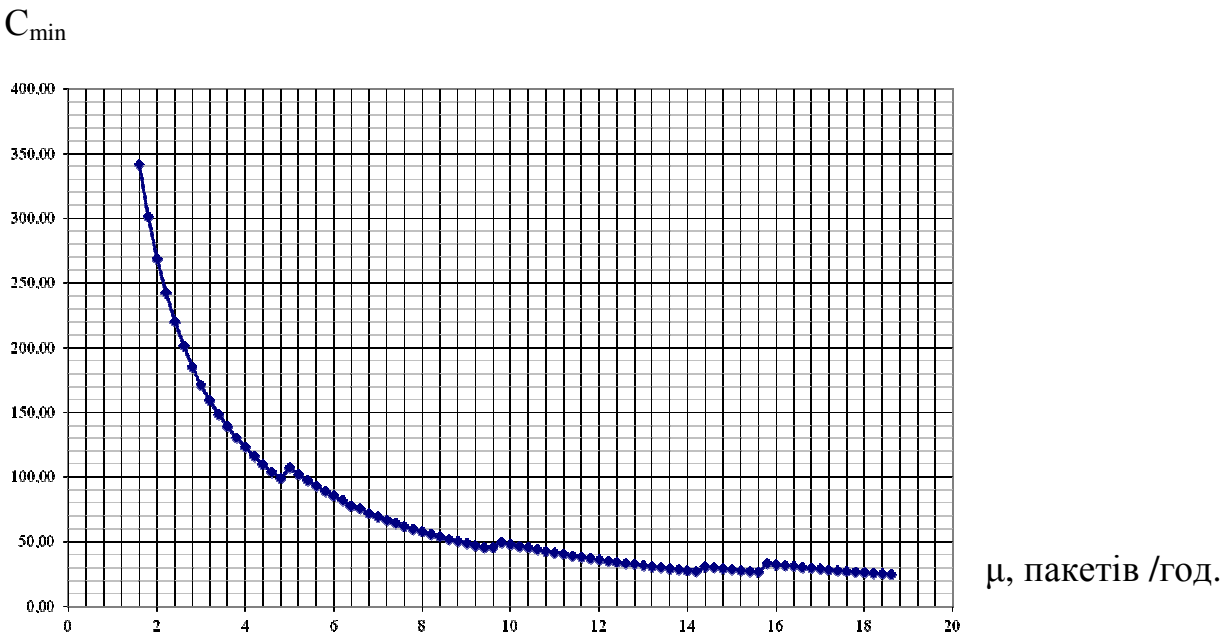


Рисунок Б.6 – Графік залежності оптимальних витрат на доставку одного пакета від сумарної інтенсивності вантажопотоків в ТТС №1

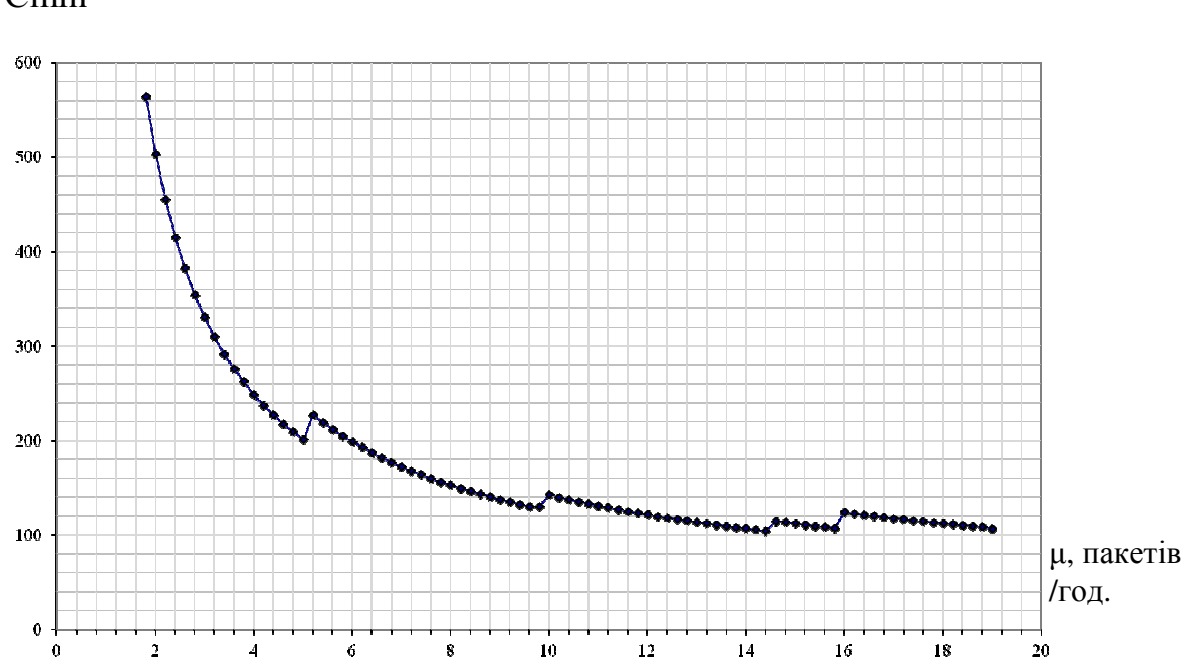


Рисунок Б.7 – Графік залежності оптимальних витрат на доставку одного пакета від сумарної інтенсивності вантажопотоків в ТТС №2

C_{min}

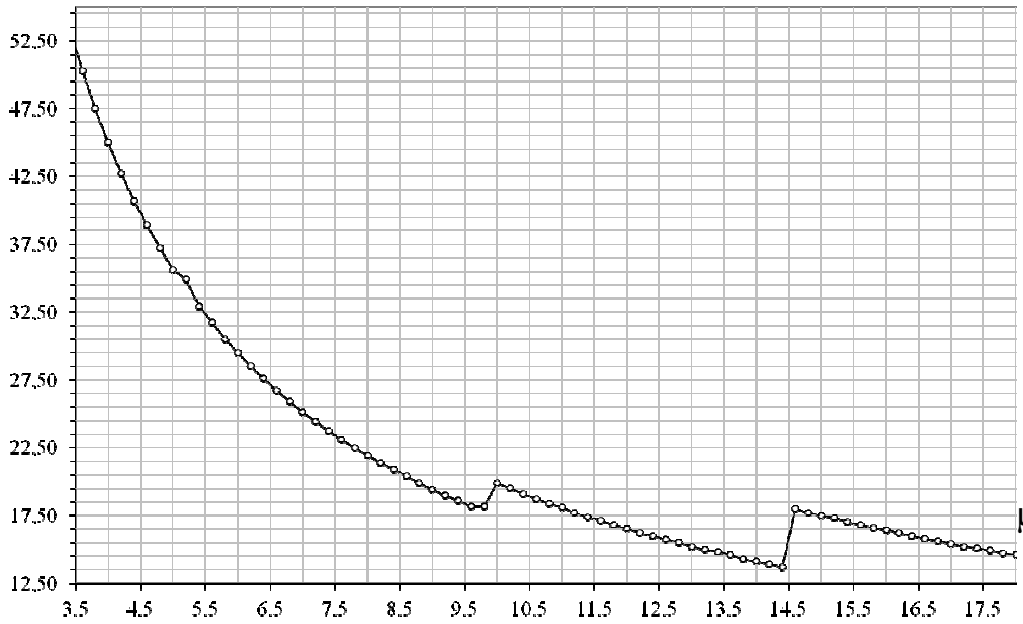


Рисунок Б.8 – Графік залежності оптимальних витрат на доставку одного пакета від сумарної інтенсивності вантажопотоків в ТТС №3

Додаток В. Лістинг програми Делфі побудови розкладів

```
unit Scedule20;
 //{$I-}
 //{$APPTYPE CONSOLE}
  {$R *.dfm}
interface

uses
  Winapi.Windows, Winapi.Messages, System.SysUtils, System.Variants,
  System.Classes, Vcl.Graphics,
  Vcl.Controls, Vcl.Forms, Vcl.Dialogs, Vcl.StdCtrls, Vcl.ComCtrls;
const
    N   =       11;    {максимальна зарезервована кількість замовлень}
    nu   =     -1e30; {мінус безмежність}
    M        =  3;    {максимальна кількість типів автомобілів}
    P        =  5;    {загальна кількість пунктів}
file1        = 'D:\Delphi\Sceduling_3\Matr1.txt';
file2        = 'D:\Delphi\Sceduling_3\Orient2.txt';
file3        = 'D:\Delphi\Sceduling_3\messages.txt';
//file4        = 'D:
type
  TForm1 = class(TForm)
    Label10: TLabel;
    procedure ButtonLoad2(Sender : TObject);
    procedure SafeButton(Sender: TObject);
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
    procedure Button6Click(Sender: TObject);
    procedure Button5Click(Sender: TObject);
    procedure Button3Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
  typD    = array[1..N+1,1..N+1] of single;
  masH    = array[1..N+1,1..N+1] of byte;
  typCr   = array[1..N+1] of single;
  typQ    = array[1..M] of set of byte;
  typH    = array[1..M] of masH;
  typMk   = array[0..M] of integer;
  type3   = array[1..N]  of set of byte;
  type4   = array[1..N] of integer;
var
             Lm         : array [1..P,1..P] of real; //матриця найкоротших відстаней
             Zb, Ze     : array[1..N] of byte;     //масив  початкових і кінцевих
                                                    //пунктів відомих замовлень
                                                    //Якщо якесь замовлення невідоме,
                                                    //то Zb і Ze для нього є рівними
             MaxTime    : real;//MaxTime    : real;   //максимальна тривалість проекту
           MinTime      : real;   //гіпотетична мінімальна тривалість проекту
                  Form1: TForm1;
            variableOut : Extended;
      i,j,k,MaxRange    : byte;
          f1,f2,f3,f4   : textfile;
     V, t_begin, t_end,
          t_latest_end  : typCr;
      NoConflict        : array[1..N,1..N] of byte;
```

```
      x,y,Pok,ka,dd,pp  : byte;
    step                : word;
Par,ContDodWag,GraphVyr,
InternalEnd             : boolean;
        a               : array[1..N+1,1..N+1] of single;
       a0               : array[1..N+1,1..N+1] of single;
    Hk                  : typH;
    Q                   : typQ;
    h,Mk                : typMk;
 frase1, frase2,frase3,
 frase4                 : string;
    Constant            : single;
                   RTT  : real;
   LateBegin, EarlyEnd  : boolean;
    Nastupnik,
  Poperednik            : type3;
  g,R                   : type4;
  AvtoNo                : array[2..N-1] of single;
  MMK1,MMk2,mmk3        : integer;
   //************************************************
Procedure ReadZMakeA;
Procedure MakeA0;
Procedure NulSet;
Procedure CalculateRT;
Procedure Early_Begin  (var ContDodWag : boolean);
Function  CromatHk ( nameType : byte; H:typH ) : single;
Procedure Conflict (var x,y:byte; var Par : boolean);
Procedure ChangeQGraph ( x,y:byte; var Pok:byte);
Procedure OutPrint;
Procedure RunOut;
Procedure CheckEnd;
Procedure NextPrev;
Procedure FindCritikalLinks;
Procedure FindLinks;
Procedure Range;
Procedure FindStructure;

 Implementation
 //*****************************************************************
 //Процедура зчитує матрицю найкоротших тривалостей руху між пунктами
 Procedure ReadZMakeA;
 //Процедура створює початковий масив A[i,j]
 Begin
   While not eof(F1) do read(f1, x, y, Lm[x,y]);
   for x:=1 to P do
      Lm[x,x]:=0;

   for i:=2 to N+1 do
    for j:=2 to N+1 do
        a[i,j]:=nu;
   Mk[1]:=MMK1;  {qн=20 т }     //Можливість одночасного вик. зам одним авто
   Mk[2]:=MMk2;   {qн=14 т }
   Mk[3]:=MMK3;
   //while not eof(F2) do
    //begin
      //readln(f2, i, a[1,i], t_latest_end[i], Zb[i],Ze[i],k);
      //Q[k]:=Q[k]+[i]
    //end;
//Зчитує  №зам., ранній поч., раннє закінч, № поч.п., №кінц. п., тип авт.
```

```
   t_latest_end[N+1]:=-MaxTime;
   for i := 2 to N do
   Begin
     for j := 2 to N do
       Begin
         a[i,j]:=Lm[Zb[i],Ze[i]]+Lm[Ze[i],Zb[j]];
         a[j,N+1]:= Lm[Zb[j],Ze[j]];
         a[i,i]:=nu;
         a[i,1]:=nu
       End;
   End;
 End;
 //*********************************************************************
Procedure MakeA0;
                  {Створює допоміжний масив часових зв'язків між замовленнями}
  Begin
   for i:=1 to N+1 do
     for j:=1 to N+1 do
       a0[i,j]:=a[i,j];
   for i:=1 to N+1 do
      for j:=1 to N+1 do
         begin

            if a[i,j]>nu then
                        if a[j,i]>nu then
                  a0[i,j]:=nu;
         end;
   for i:=1 to N+1 do
     begin
      a0[i,i]:=0;
      //a0^[N,i]:= a^[N,i]
     end;
  End;
//*********************************************************************
Procedure NulSet;
                  {Процедура занулює ранні закінчення операцій  }
  Begin
    //frase1:='';
    //frase2:='';
    for i := 2 to N-1 do
      AvtoNo[i]:=1;

    for k:=1 to M do
     for i:=1 to N+1 do
      for j:=1 to N+1 do
        Hk[k,i,j]:=0;
    for i:=1 to N+1 do
                  begin
                    t_begin[i]:=0;
                    t_end[i]:=0;
                    V[i]:=0
                  end;
   End;
{*****************************}
 Procedure CalculateRT;
      { Підраховує показник тривалості процесу - час завершення виконання
      останнього в черзі замовлення}

 Begin
```

```
 RTT:=0;
 for i:=1 to N do
  if RTT < (t_begin[i]+a[i,N+1]) then
        RTT:= (t_begin[i]+a[i,N+1]);

End;
//*****************************************************
Procedure Early_Begin  (var ContDodWag : boolean);
 {Визначає ранні закінчення, перевіряє наявність в графі А0
   контура додатньої ваги}
 label M1;
 var
    a1,a2 : typD;
    lich  : byte;
       f  : double;
 Begin
   { ініціалізація a1,a2 - допоміжні масиви, аналоги a0}
     LateBegin:=false;
     for i:=1 to N+1 do
       for j:=1 to N+1 do
          begin
             a1[i,j]:=a0[i,j];
             a2[i,j]:=a1[i,j];
          end;
 for lich:=1 to N+1 do
 begin
  for i:=1 to N+1 do
     if a1[i,lich] > nu then
        for j:=1 to N+1 do
            if (a1[i,j]<a1[i,lich]+a1[lich,j])  then
             a2[i,j]:=a1[i,lich]+a1[lich,j];
   a1:=a2;
 end;
 for i:=1 to N do
   for j:=1 to N do
      if a1[i,j] < -MaxTime then a1[i,j]:=nu;
 a2:=a1;
 ContDodWag:=false;
 for i:=1 to N do
    if a2[i,i]>0 then
     begin
        ContDodWag:=true;                    //перевірка наявності петель
       // writeln(f3, 'У початкових даних є помилка');     //у графі
        frase1:=   'У початкових даних є помилка';
     end;

 if ContDodWag=false then
    begin
          for i:=1 to N do
             begin
            t_begin[i]:=0;
                     V[i]:=nu;
                     if (a2[1,i]>t_begin[i]) then
              begin
                t_begin[i]:=a2[1,i];
              end;
            for j:=1 to N do
                       if a2[i,j]>V[i] then V[i]:=a2[i,j];
       end;
```

```
          end;
      for i:=1 to N do
        if t_begin[i]>a[1,i] then
         LateBegin:= true;
     CalculateRT;
End;
Procedure Conflict (var x,y:byte;var Par:boolean);
     {Процедура визначає конфліктні ребра і найконфліктніше з них x-y
     Якщо конфліктне ребро знайдено, то вихідний параметр Par=true}
  var   Mju, max, Hij, Hji, min : single;
        aaa, aa: byte;
  Begin
   Par:=false;
   Mju:=V[1];
   for i:=2 to N do
    if V[i]>Mju then Mju:=V[i];
   max:=nu;
   x:=0;
   y:=0;
   for i:=1 to N do
    for j:=1 to N do
      if ((NoConflict[i,j]=0) and
        (a[i,j]>0) and (a[j,i]>0)){} and
       ((t_begin[j]-t_begin[i]) < (a[i,j])) or ((t_begin[j]-t_begin[i])>-a[j,i])))){}
          then
           begin
             hij:=t_begin[i]+a[i,j]+V[j]-Mju;
             hji:=t_begin[j]+a[j,i]+V[i]-Mju;
             if hij<hji then hij:=hji;
             {if hij<min  }
              if max<hij
                          then
                            begin
                               max:=hij;
                               x:=i;
                                    y:=j;
                              end;
           end;
   if (x=0) and (y=0) then
                       begin
                         //writeln(f3,' Конфліктних ребер нема ');
                         Par:=true;
                       end;
  End;
//*********************************************************
 Procedure  CheckEnd;
   var iii,const1 : byte;
      Begin
        const1:=0;
        EarlyEnd := true;
        for iii:= 2 to N do
          begin
             t_end[iii]:= t_begin[iii]+a[iii,N+1];
             if (t_begin[iii]+a[iii,N+1]>t_latest_end[iii]) then
               const1:=const1 + 1;
          end;
          if const1 >0 then
          EarlyEnd := false;
      End;
```

```
     //-------------------------------------
Procedure ChangeQGraph ( x,y:byte; var Pok:byte);
// процедура змінює початковий граф залежно від критеріїв
  var H1,H2              : typH;
      Um1,Um2,ConDodWag,
      povtor             : boolean;
      xx,yy,xk,yk,l,
      kaa, typavtomob,
      nnn                : byte;
      T1,T2,T3           : real;

  {*****************************}

 Begin
  Um1:=true;         //умова що хроматичне число графа H1 перевищує Mk
  Um2:=true;         //умова що хроматичне число графа H2 перевищує Mk
  Povtor:=true;      //Умова, що потрібно повторно шукати конфліктне ребро
  T1:=-nu;
  T2:=-nu;
  T3:=-nu;
  for ka:=1 to M do
                   begin
                     H1[ka]:=Hk[ka];
                     H2[ka]:=Hk[ka];
                   end;
  xx:=x; yy:=y;
  xk:=x; yk:=y;
     for typavtomob:=1 to M do
     if (xk in Q[typavtomob]) then  ka:=typavtomob;
     if (yk in Q[ka]) then             //Перевірка, чи обидва замовлення
                                       // виконуються одним типом автомобілів
                 begin
                   H1[ka,xk,yk]:=N+1;
                   H1[ka,yk,xk]:=N+1;
                   for i:=1 to N do
                       begin          // Побудова симетричної матриці H1
                       if H2[ka,yk,i]>N+1 then
                           H2[ka,xk,i]:=H2[ka,yk,i];
                       if H2[ka,i,yk]>N+1 then
                           H2[ka,i,xk]:=H2[ka,i,yk];
                       end;
                 end;
             begin
               if (CromatHk(ka,H1)>Mk[ka]) then Um1:=False;  //Умова дозволу
                                                             //перетворення ребра на
                                                             //дугу
               if (CromatHk(ka,H2)>Mk[ka]) then Um2:=False;  //Умова дозволу
                                                             //видалення ребра
                       for i:=2 to N do
                       if i in Q[ka] then  //Якщо граф має петлі
                                begin        //то обидві умови не виконуються
                                    if H1[ka,i,i]=N+1 then Um1:=false;
                                    if H2[ka,i,i]=N+1 then Um2:=false
                                end;
             end;

     //Якщо будь-яка зміна в графі H приводить до перевищення хроматичного числа
     //то граф є вироджений і за ним не можна побудувати розклад
```

```
    if (Um1 = false) and (Um2=false) then
             begin
                //writeln (f3,'   Початкові дані помилкові. За ними не можна побудува-
ти розклад');
                frase1:= 'Початкові дані помилкові. За ними не можна побудувати розк-
лад';
                GraphVyr:=True;
                Povtor:=False;
                NoConflict[xx,yy]:=1;
                NoConflict[yy,xx]:=1;
                exit;
             end;

    if (Um1 = true) then   //Якщо є дозвіл видалити, то ним і скористаюсь
     begin
       Early_Begin(ContDodWag);
       CheckEnd;
       if ((((yy in Q[ka]) and (xx in Q[ka]))
       and (ContDodWag=false)
          and (EarlyEnd=true)
             {and (LateBegin=false)})) then
               T1:= RTT
               else  T1:=-nu;
     end;

    if (Um1 = false) and (Um2=true) then   //Якщо є дозвіл тільки на зміну ребра
      begin
           begin
             a0[xx,yy]:=A[xx,yy];  //спробувати замінити ребро xx-yy на дугу xx-yy
             a0[yy,xx]:=nu;
             Early_Begin(ContDodWag);
             CheckEnd;
             if RTT  > (-a0[N+1,1]) then
                begin
                  //writeln(f3,'Попередження про перевищення допустимого часу');
                  frase2:=  'Попередження про перевищення допустимого часу';
                  exit
                end;
             if ((ContDodWag=false) and (EarlyEnd=true) {and (LateBegin=false)}) then
                                T2:=RTT
                                       else
                                T2:=-nu;
           end;
           begin
             a0[xx,yy]:=nu;       //спробувати замінити ребро xx-yy на дугу xx-yy
             a0[yy,xx]:=A[xx,yy];
             Early_Begin(ContDodWag);
             CheckEnd ;
             if RTT  > (-a0[N+1,1]) then
                begin
                  //writeln(f3,'Попередження про перевищення допустимого часу');
                  frase2:= 'Попередження про перевищення допустимого часу';
                  exit
                end;
             if ((ContDodWag=false) and (EarlyEnd=true) {and (LateBegin=false)}) then
                                T3:=RTT
                                     else
                                T3:=-nu;
           end;
```

```
        if T2<T3 then Pok:=2
                    else begin
                            T2:=T3;
                            Pok:=3
                           end;
       end;
       if Um1=true then
          if T1<T2 then
                      begin
                         Pok:=1;
                         T2:=T1
                      end;
          if ((T1<=-nu) and (T2<=-nu) and (T3<=-nu)) then
                       begin
                          //writeln(f3,'Не можна виконати задані замовлення в необхід-
ному порядку');
                    frase2:= 'Не можна виконати задані замовлення в необхідному поряд-
ку';
                  beep;
                  {Pok:=1;}
                  Povtor:=False;
                  NoConflict[xx,yy]:=1;
                  NoConflict[yy,xx]:=1;
                  GraphVyr:=true;
                  exit;
                        end;
      a0[xx,yy]:=nu;
      a0[yy,xx]:=nu;
      case Pok of                    //ребро xx-yy видалити
      1:begin
           for i:=1 to M do
           Hk[i]:=H1[i];
        end;
      //*****************************************************************
      2:begin                       //ребро xx-yy змінити на дугу xx-yy
                for i:=1 to M do
               Hk[i]:=H2[i];
               a0[xx,yy]:=A[xx,yy];
                    a0[yy,xx]:=nu;
               Early_Begin(ContDodWag);
               CheckEnd
        end;
       //*****************************************************************
      3:begin                       //ребро xx-yy змінити на дугу yy-xx
                for i:=1 to M do
               Hk[i]:=H2[i];
               a0[yy,xx]:=A[yy,xx];
                    a0[xx,yy]:=nu;
               Early_Begin(ContDodWag);
               CheckEnd ;
        end;
      end;
       // Якщо жоден з трьох варіантів не підходить
      if Povtor then
      begin
        NoConflict[xx,yy]:=1;
        NoConflict[yy,xx]:=1;
        //write(f3, ' є вже не конфліктне');
      end;
```

```
  End;
Procedure NextPrev;
 {процедура формує множини попередників і наступників для кожного замовлення}

Begin
  for i:=1 to N+1 do
    begin
     Nastupnik[i]:=[];
     Poperednik[i]:=[];
     g[i]:=0;
    end;
     for i:=1 to N+1 do
      for j:=1 to N+1 do
         if (a0[j,i]>0) then
           Poperednik[i]:=Poperednik[i]+[j];
    for j:=1 to N+1 do
     for i:=1 to N+1 do
       if (j in Poperednik[i]) then
          g[i]:=g[i]+1;
    for i:=1 to N do
     for j:=1 to N do
         if a0[i,j]>0 then Nastupnik[i]:=Nastupnik[i]+[j];
   End;
//*************************************************************
Procedure Range;
 //Процедура визначає ранг кожного замовлення

 var kk : byte;
     C  : set of byte;
massage : boolean;

 Begin
  kk:=0;
  for i:=1 to  N+1 do
    R[i]:=N+1;
  MaxRange:=0;
  C:=[1..N+1];
  while C<>[] do
    begin
     massage:=false;
     for i:=1 to N+1 do
      if (i in C) and (g[i]=0) then
                                    begin
                                      massage:=true;
                                      R[i]:=kk;
                                      C:=C-[i];
                                    end;
     for i:=1 to N+1 do
      if (R[i]=kk) then
       begin
       for j:=1 to N+1 do
          if (j in Nastupnik[i]) then
                g[j]:=g[j]-1;
      end;
      if massage=false then
           writeln(f3,'ф Є®-вгр');
     kk:=kk+1;
  End;
  for i:=1 to N do
```

```
  if MaxRange<R[i] then MaxRange:=R[i];
End;
{***********************************************}
Procedure FindStructure;
 {шукає ланцюги}

 Begin
   assign(f4,'tempor.dat');
   rewrite(f4);
   for i:=1 to N+1 do t_begin[i]:=0;
   for k:=0 to MaxRange do
     for i:=1 to N+1 do
      if R[i]=k then
       for j:=1 to N+1 do
        if i in Poperednik[j] then
          if t_begin[j] < (t_begin[i] + a0[i,j]) then
             begin
               t_begin[j]:=t_begin[i] + a0[i,j];
               {if t_end[j]<>0 then}
                  writeln(f3,i,' ',j);
                  writeln(f4,i,' ',j);
             end;
   for k:=1 to N+1 do
     begin
        reset(f4);
       while not EoF(f4) do
         begin
           readln(f4,i,j);
           if (k=j) then pp:=i
         end;

     end;
     close(f4);
     Erase(f4);
 End;
{***********************************************}
Procedure FindLinks;
type SetByte=set of byte;
     Masr= array[1..n+1] of byte;
var
    mmm:Masr;
    Lanzug : SetByte;
    Lizylnyk : byte;
Procedure Recurs(k,l:byte;lanzug:SetByte;mmm:masr);
var Recursmas,i :byte;
begin
   for RecursMas:=1 to N+1 do
     if (RecursMas<>k) then
        if (a0[k,RecursMas]>0)
        then
           begin
              if RecursMas in Lanzug then
                 begin for i:=1 to l-1 do
                       write(f3,mmm[i],' ');
                       writeln(f3,RecursMas);
                       Lizylnyk:=Lizylnyk+1;
                       exit;
                  end;
               mmm[l]:=RecursMas;
```

```
              Recurs (RecursMas,l+1,Lanzug+[RecursMas],mmm);
            end;
end;
begin
        for i:=1 to n+1 do
      begin
              Lizylnyk:=1;
              write (f3,'**',i,' ' );
              //readln;
              mmm[1]:=i;
              Recurs(i,2,[i],mmm);
      end;
end;
{*****************************************************************}
Procedure FindCritikalLinks;
 begin
  NextPrev;
  Range;
  FindStructure;
  FindLinks;
 end;
{*********************************************************************}
Procedure RunOut;
label mit1,mit2,mit3,m9;
begin
   ReadZMakeA;
//while (MaxTime-Constant >= MinTime) do
 BEGIN
  for i:=1 to N do
    for j:=1 to N do
       NoConflict[i,j]:=0;
  GraphVyr:=false;
  NulSet;        //Занулення початкової матриці
  MakeA0;       //Створюємо матрицю без ребер
  //step:=step+1;
  constant:=constant+1;
  a0[N+1,1]:= -MaxTime;     //Обмеження по максимальній тривалості циклу
  frase2:= 'Час прогнозування ' + floattostr(-a0[N+1,1])+' год.';
  //writeln(f3,'Час прогнозування ',-a0[N+1,1]:3:1,' год.');
mit1:  Early_Begin(ContDodWag);
       if ContDodWag=true then   //Перевіряємо, чи є контур додатньої ваги
                                 //Якщо є, то переходимо до наступного кроку
                     begin
  frase2:= ' З такими обмеженнями програма вже не може побудувати допустимого розкла-
ду. Змініть часові обмеження';
                        //writeln(f3,' З такими обмеженнями програма вже не може');
                    //writeln(f3,' побудувати допустимого розкладу');
                    //writeln(f3,' Змініть часові обмеження');
                    goto M9;
                       end;
mit2: Conflict(x,y,Par);   //перевіряє наявність конфліктних ребер
      if Par=true then goto mit3;
     // write(f3,'конфліктне ребро ', x, '  ',y, '  ');
      ChangeQGraph(x,y,Pok);
      if GraphVyr=true then
                      begin
                         //writeln(f3,'граф вироджений ',x,' ',y,' ');
                         goto mit1;
                      end;
```

```
     // writeln(f3,', змінено у варіанті ',Pok);
      if Pok=1 then goto mit2
      else goto mit1;
mit3:
        //нема конфліктних ребер. програма закінчена
   End;
   M9:
end;
//***********************************************************

procedure TForm1.ButtonLoad2(Sender: TObject);
begin
 if (Length(Edit1.Text) = 0) or (Length(Edit2.Text) = 0)   then
   begin
     Label2.Font.Color := clMaroon;  // темно-червоний
     Label2.Caption := 'Треба заповнити усі поля форми';
     readln;
     //halt;
   end
   else
   begin
     Label2.Font.Color := clNavy;
     MaxTime:=StrToFloat(Edit1.Text);
     MMK1:= StrToInt(Edit2.Text);
     MMK2:=StrToInt(Edit2.Text);
     MMK3:=StrToInt(Edit2.Text);
   end;
     Begin
      a[1,2]:=StrToFloat(Edit9.Text);
      a[1,3]:=StrToFloat(Edit10.Text);
      a[1,4]:=StrToFloat(Edit11.Text);
      a[1,5]:=StrToFloat(Edit12.Text);
      a[1,6]:=StrToFloat(Edit3.Text);
      a[1,7]:=StrToFloat(Edit4.Text);
      a[1,8]:=StrToFloat(Edit5.Text);
      a[1,9]:=StrToFloat(Edit6.Text);
      a[1,10]:=StrToFloat(Edit7.Text);
      a[1,11]:=StrToFloat(Edit13.Text);

      t_latest_end[2]:= StrToFloat(Edit14.Text);
      t_latest_end[3]:= StrToFloat(Edit15.Text);
      t_latest_end[4]:= StrToFloat(Edit16.Text);
      t_latest_end[5]:= StrToFloat(Edit17.Text);
      t_latest_end[5]:= StrToFloat(Edit17.Text);
      t_latest_end[6]:= StrToFloat(Edit8.Text);
      t_latest_end[7]:= StrToFloat(Edit18.Text);
      t_latest_end[8]:= StrToFloat(Edit23.Text);
      t_latest_end[9]:= StrToFloat(Edit28.Text);
      t_latest_end[10]:= StrToFloat(Edit33.Text);
      t_latest_end[11]:= StrToFloat(Edit34.Text);

      Zb[2]:=  StrToInt(Edit19.Text);
      Zb[3]:=  StrToInt(Edit20.Text);
      Zb[4]:=  StrToInt(Edit21.Text);
      Zb[5]:=  StrToInt(Edit22.Text);
      Zb[6]:=  StrToInt(Edit35.Text);
      Zb[7]:=  StrToInt(Edit36.Text);
      Zb[8]:=  StrToInt(Edit37.Text);
      Zb[9]:=  StrToInt(Edit38.Text);
```

```
      Zb[10]:=  StrToInt(Edit39.Text);
      Zb[11]:=  StrToInt(Edit40.Text);

      Ze[2]:=  StrToInt(Edit24.Text);
      Ze[3]:=  StrToInt(Edit25.Text);
      Ze[4]:=  StrToInt(Edit26.Text);
      Ze[5]:=  StrToInt(Edit27.Text);
      Ze[6]:=  StrToInt(Edit41.Text);
      Ze[7]:=  StrToInt(Edit42.Text);
      Ze[8]:=  StrToInt(Edit43.Text);
      Ze[9]:=  StrToInt(Edit44.Text);
      Ze[10]:=  StrToInt(Edit45.Text);
      Ze[11]:=  StrToInt(Edit46.Text);

      for k:=1 to M do
         Q[k]:=[];
      k:= StrToInt(Edit29.Text);
      Q[k]:=Q[k]+[2];
      k:= StrToInt(Edit30.Text);
      Q[k]:=Q[k]+[3];
      k:= StrToInt(Edit31.Text);
      Q[k]:=Q[k]+[4];
      k:= StrToInt(Edit32.Text);
      Q[k]:=Q[k]+[5];
      k:= StrToInt(Edit47.Text);
      Q[k]:=Q[k]+[6];
      k:= StrToInt(Edit48.Text);
      Q[k]:=Q[k]+[7];
      k:= StrToInt(Edit49.Text);
      Q[k]:=Q[k]+[8];
      k:= StrToInt(Edit50.Text);
      Q[k]:=Q[k]+[9];
      k:= StrToInt(Edit51.Text);
      Q[k]:=Q[k]+[10];
      k:= StrToInt(Edit52.Text);
      Q[k]:=Q[k]+[11];
     End;

    //label1.caption:=frase2;
    AssignFile(F1, file1);
    Reset(F1);
    //AssignFile(F2, file2);
    //Reset(F2);
    RunOut;
    label2.caption:='Програма виконана';
    CalculateRT;
    label11.caption:='Мінімальна тривалість цього проекту = '+floattostr(RTT)+' год.';
    beep;
    Closefile(F1);
    //Closefile(F2);
    AssignFile(F3,file3);
    Rewrite(F3);
    OutPrint;
    beep;
    CloseFile(F3);
end;

procedure TForm1.SafeButton(Sender: TObject);
begin
```

```
  AssignFile(F2,file2);
  rewrite(F2);
  //append(F2);
    for i:= 2 to N do
    begin
      write(f2,i,' ',a[1,i]:1:0,' ',t_latest_end[i]:1:1,' ',Zb[i],' ',Ze[i],' ');
      for k := 1 to M do
        if i in Q[k] then
          writeln(f2,k)
    end;
  closefile(f2);
end;


procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
begin
  TreeView1.Items.Clear; // очистка список
end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
   TreeView1.Items.Clear; // очистка списку
  for i := 2 to N do
    begin
      TreeView1.Items.Add(nil, 'Замовлення ' + IntToStr(i-1));
      TreeView1.Items.AddChild(TreeView1.Items.Item[(i-2)*6], 'Початок = ' +
FloatToStr(t_begin[i]) );
      TreeView1.Items.AddChild(TreeView1.Items.Item[(i-2)*6], 'Завершення = ' +
FloatToStr(t_end[i]));
      TreeView1.Items.AddChild(TreeView1.Items.Item[(i-2)*6], 'Виконується автомобілем
№ ' + FloatToStr(AvtoNo[i]));
      TreeView1.Items.AddChild(TreeView1.Items.Item[(i-2)*6], 'Від пункту – ' +
IntToStr(Zb[i]));
      TreeView1.Items.AddChild(TreeView1.Items.Item[(i-2)*6], ' до пункту – ' +
IntToStr(Ze[i]));

    end;
    TreeView1.FullExpand;
  end;

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
  AssignFile(F2,file2);
  append(F2);
    while not eof(f2) do
    begin
      read(f2,i,a[1,i],t_latest_end[i],Zb[i],Ze[i],k);
      Q[k]:=Q[k]+[i]
    end;
  closefile(f2);
end;

procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
begin
  close
end;

end.
```

Додаток Г Початкові дані і програма цілочисельного програмування транспортних циклів в електронних таблицях Excel

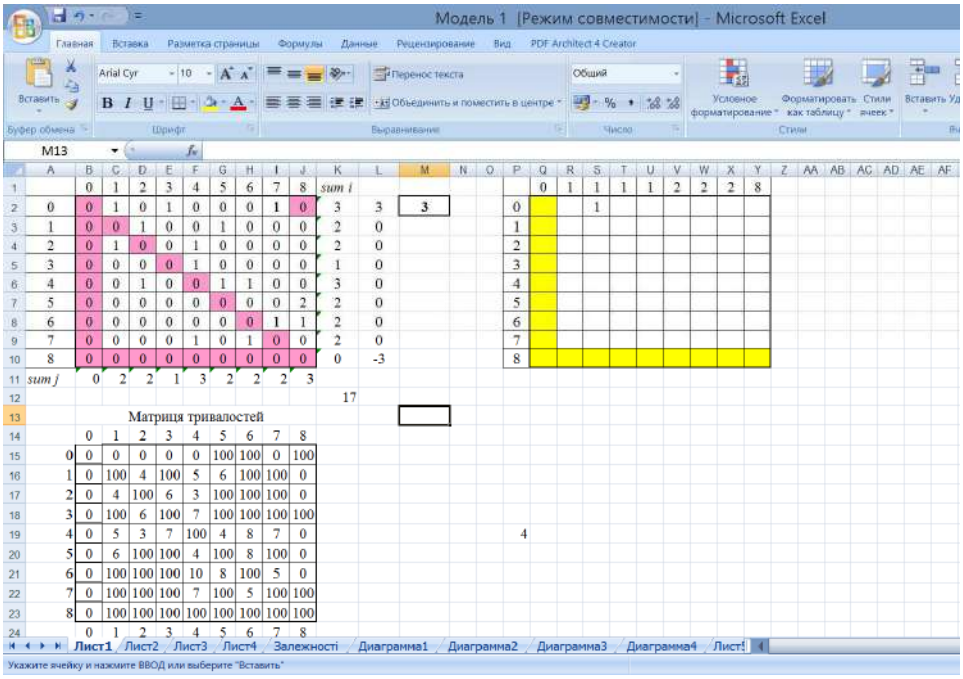


Рисунок Г.1 – Початкові дані програмування

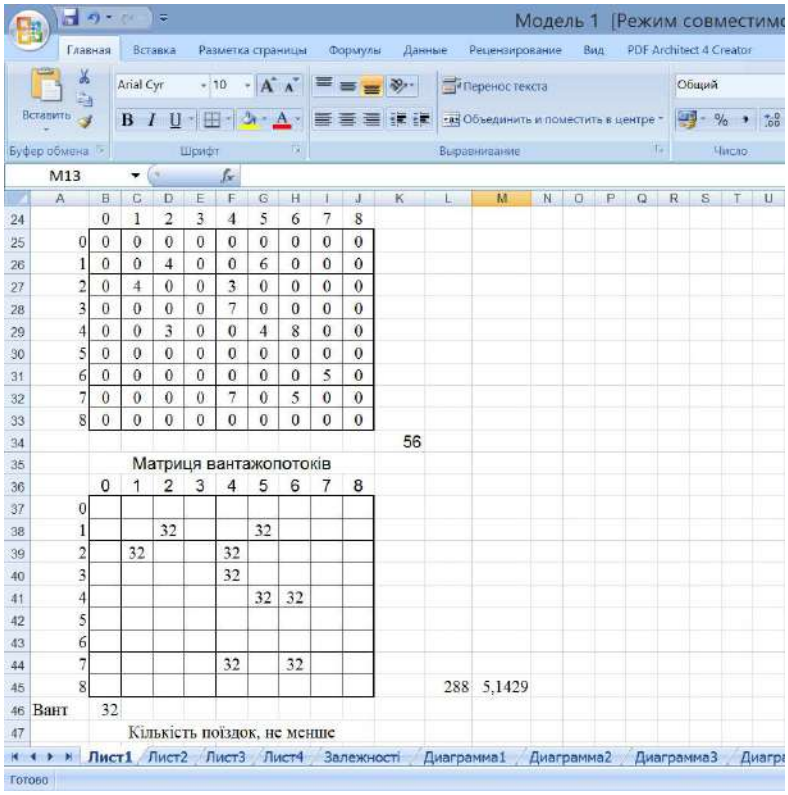


Рисунок Г2 – Початкові дані програмування

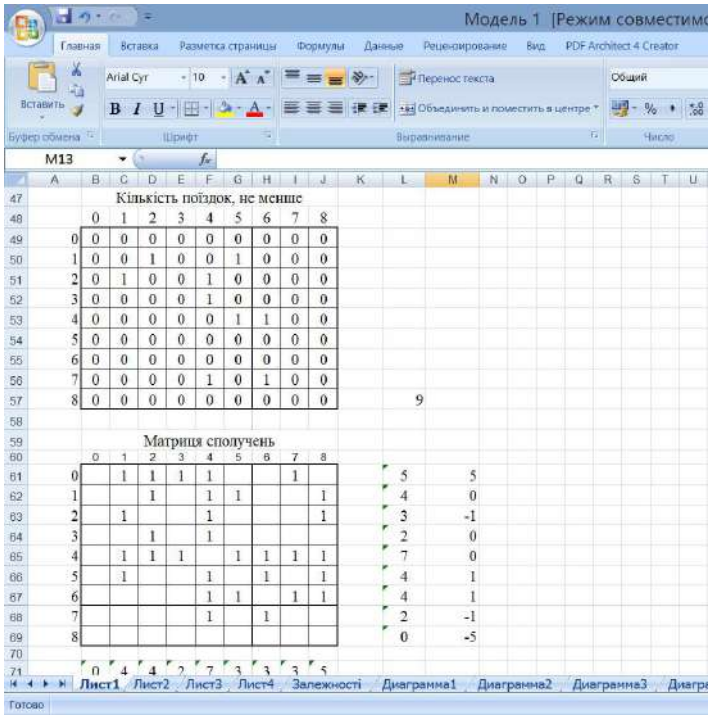


Рисунок Г.3 – Початкові дані програмування

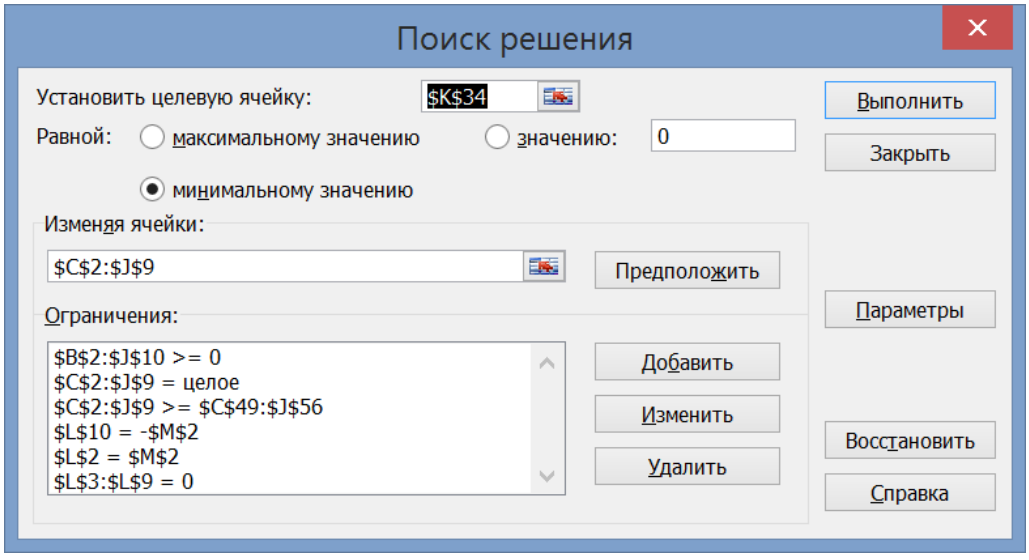


Рисунок Г.4 – Діалогове вікно

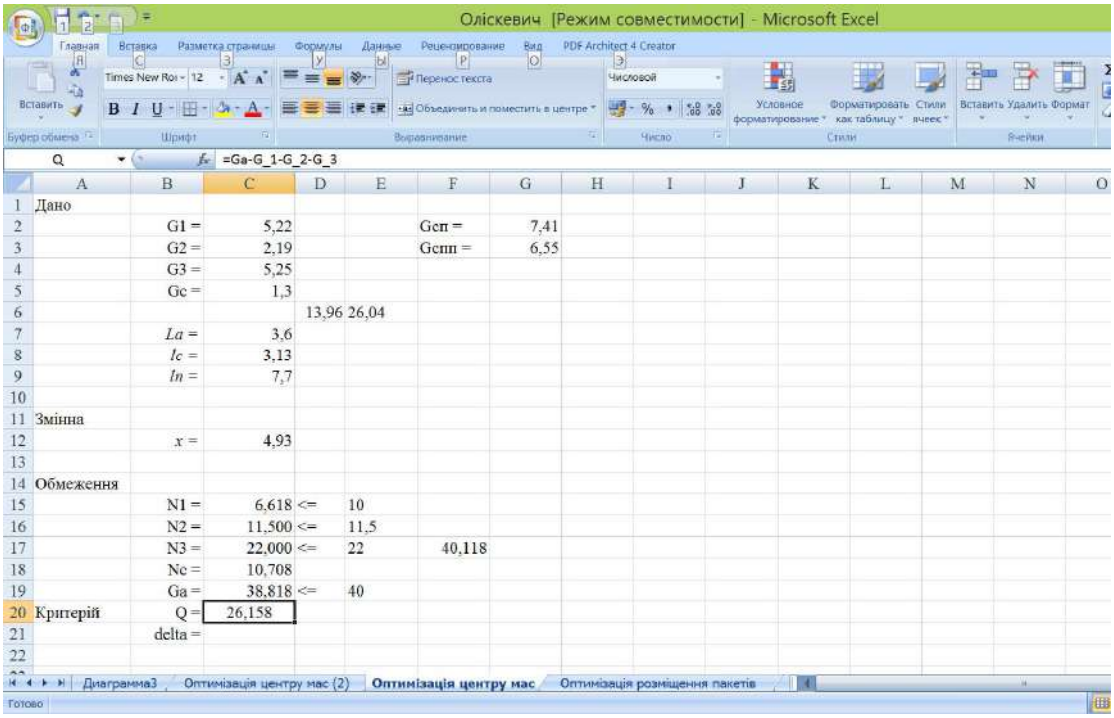


Рисунок Г.5 – Оптимізація індивідуальної схеми навантаження для автопоїзда з конкретними заданими розмірними і ваговими параметрами (початкові дані програмування)

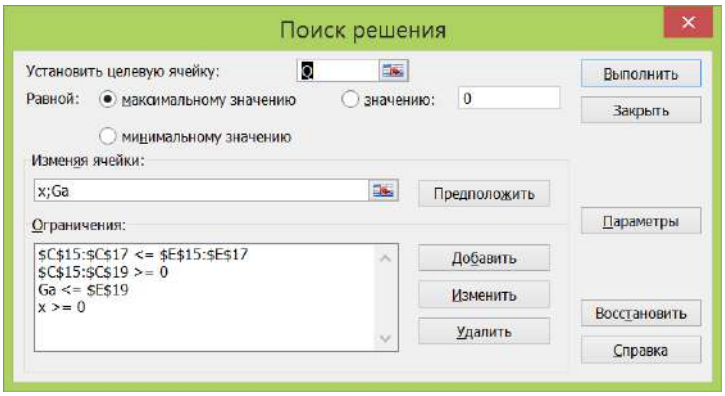


Рисунок Г.6 – Оптимізація індивідуальної схеми навантаження для автопоїзда (діалогове вікно)

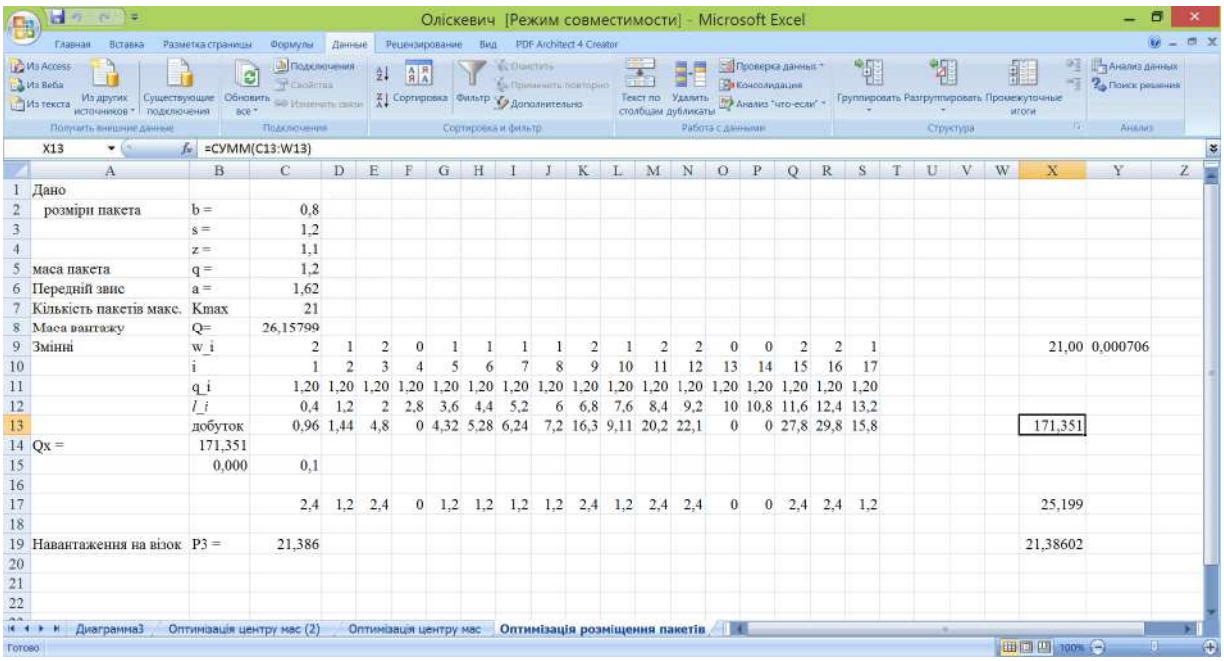


Рисунок Г.7 – Оптимальний розподіл маси вантажів по усьому простору напівпричепа (початкові дані)

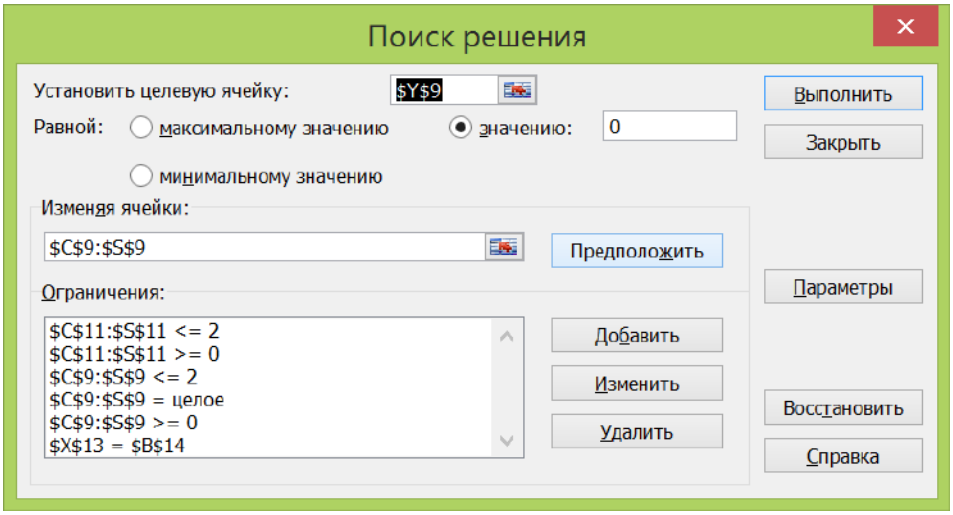


Рисунок Г.8 – Оптимальний розподіл маси вантажів по усьому простору напівпричепа (діалогове вікно)

Додаток Д Лістинг програми Делфі імітаційного моделювання руху автомобіля-спостерігача вздовж магістралі

```
unit Simulation_3;
interface

uses
  Winapi.Windows, Winapi.Messages, System.SysUtils, System.Variants, System.Classes,
Vcl.Graphics,
  Vcl.Controls, Vcl.Forms, Vcl.Dialogs, Vcl.StdCtrls, Vcl.ComCtrls;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    procedure ButtonPress(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

const
 NumRow = 15; //кількість рядків для читання
 S  = 14;  //кількість кроків моделювання
 Na = 2;   //кількість автомобілів
 Nc = 8;
 Vdo = 20; //бажана швидкість спостерігача
 Va  = 50;  //відносна швидкість зустрічних
 Rf  = 40;
 Rb  = -40;
 jxmax = 5; //максимальне прискорення
 jymax = 5; //максимальне сповільнення
 randomspeed = 40;
 randomcoordinate = 15;
 File1 ='D:\Delphi\Simulation\Data2.txt';
 File2 ='D:\Delphi\Simulation\Result4.txt';

var
  Form1 : TForm1;
   X,Vi : array[0..S,0..Nc] of integer;    //супутній
   Y,Vy : array[0..S,0..Na] of integer;  //зустрічний
  Vd    : array[0..Nc] of integer;
  DeltaV: array[0..S,0..Nc] of integer;
  DeltaX  : array [0..Nc] of integer;
  F1,F2 : textfile;
  i, ii,j : integer;
  step  : integer;
  acseleration : integer;
  OutRunSteps  : integer;
  deltaVc      : integer;
  deltaVsum,deltaVosum : real;


 procedure Initial;
 //function  ForvardAxeleration(var n :integer):integer;
 function  CheckFreeCell(var n : integer) : integer;  //видає кількість вільних кліти-
нок вперед
 function  OutRunning(var n : integer): integer;
 procedure GenerateApprouching;
 procedure CheckBracking(var z: integer);
 function  CheckFreeCellOut (var n,s : integer) : integer;
 Procedure RelativeTransmission (var n : integer);
 procedure RelativeTransmissionLeft(var z : integer);
 procedure GenerateNew;
 {$R *.dfm}
 implementation
 //*****************************************************************************
```

```
//Ініціалізація нульових масивів
procedure Initial;
  begin
    for i := 0 to Nc do
      begin
        Vi[0,i]:=Vdo;   //спочатку усі мають швидкість = шв. АС
        for j := 1 to S do
          begin
            X[j,i]:=Rf;
            DeltaV[j,i]:=0
          end;
      end;
    for i := 1 to Nc do
       DeltaV[0,i]:= Vd[i]-Vi[0,i]
  end;
//*****************************************************************************
//Переміщення відносно АС без прискорення і без сповільнення  вправо
Procedure RelativeTransmission (var n : integer);
  var z,h,c,cmin,t,FreeCell : integer;
    begin
      cmin:=Rf;
      t:=n;
      for z := 0 to Nc do
         if (((X[Step,z]-X[Step,n])<cmin) and ((X[Step,z]-X[Step,n])>0)) then
          begin
            t:=z;
            cmin:= (X[Step,z]-X[Step,n])
          end;
      if ((cmin-1)<(Vi[step,n]-Vdo)) then
        FreeCell:= cmin-1 else
           FreeCell:= (Vi[step,n]-Vdo);
       X[Step,n]:=X[Step,n]+ FreeCell;
       if FreeCell>0 then
          Vi[step,n]:=Vi[step,n] else
             Vi[step,n]:=Vi[step,t];
       deltaV[step,n]:=Vd[n]-Vi[step,n]
    end;
//*****************************************************************************
//Перевірка можливості обгону на задану кількість кроків вперед DeltaForvard
//Якщо в масиві Y є хоча б один автомобіль на відстані X-Y, яка менша від можливого
//часу обгону, то обгон не здійснюється

function OutRunning(var n : integer): integer;
var ii, jj, cell, cellmin : integer;
begin
  for ii := 0 to Na do
     begin
      cellmin:= Rf;
      cell:= Rf;
      if Y[step,ii]-Vy[step,ii]<=X[step,n]+DeltaV[step,n] then
        begin
          cell:= DeltaV[step,n];
          if cellmin>cell then
            cellmin:= cell
        end else
        begin
          for jj := 2 to DeltaV[step,n] do
            if Y[step,ii]-Vy[step,ii]-X[step,n]+jj>=2 then
              begin
                cell:= jj;
                cellmin:=jj
              end else
              begin
                cell:= 0;
                cellmin:=0
              end;
        end;
     end;
     OutRunning:=cellmin

end;
```

```
//*****************************************************************************
procedure CheckBracking(var z : integer);
  var jj,jmax, zj : integer;

  begin
    for jj:=0 to Nc do             //занулення початкового масиву DeltaX
        DeltaX[jj]:=0;
    if -DeltaV[Step,z]<= jymax then      //перевірка на максимальне сповільнення
      jmax:=DeltaV[Step,z] else
        jmax:= jymax;
    if jmax<0 then
      for  jj:=1 to (-jmax) do
        begin
         X[step,z]:= X[step,z]-1;
         DeltaX[z]:=DeltaX[z]-1;
         Vi[step,z]:=Vi[step,z]-1;
          for zj := Nc downto 0 do
            begin
              if ((X[step,zj]=X[step,z]) and (zj<>z)) then
                 DeltaX[zj]:=DeltaX[zj]-1
            end;
        end;
     for jj := Nc downto 0 do
       begin
         if ((DeltaX[jj]<0) and (jj<>z)) then
          begin
            X[step,jj]:=X[step,jj]+DeltaX[jj];
            Vi[step,jj]:= Vi[step,z];
            DeltaV[step,jj]:= Vd[jj]-Vi[step,jj];
          end;
       end;
      for jj := 0 to Nc do
        DeltaV[step,jj]:= Vd[jj]-Vi[step,jj];
  end;
// *****************************************************************************
//Визначає кількість вільних клітин вперед для розгону
 function CheckFreeCell( var n : integer) : integer;
    var z,h,c,cmin,t: integer;
    begin
      cmin:=Rf;
      t:=n;
      for z := 0 to Nc do
         if (((X[Step,z]-X[Step,n])<cmin) and ((X[Step,z]-X[Step,n])>0)) then
           begin
             t:=z;
             cmin:= (X[Step,z]-X[Step,n])
           end;
      if (cmin-1)<DeltaV[step,n] then
        begin
          CheckFreeCell:= cmin-1;
          Vi[step,n]:= Vi[step,t];
          DeltaV[step,n]:= Vd[n]-Vi[step,n]
        end
      else
        begin
           CheckFreeCell:= DeltaV[step,n];
           Vi[step,n]:= Vd[n];
           DeltaV[step,n]:= Vd[n]-Vi[step,n]
        end;
    end;
//*****************************************************************************
//Визначає можливість для обгону на одну клітинку за попередником і якщо бажаний
// простір є, то видає добро на обгон
 function CheckFreeCellOut (var n, s : integer) : integer;
  var z,t,tmax    : integer;
      c,cc,cmin   : integer;
      cond        : boolean;
    begin
      c:=0;
      cc:=0;
      cmin:=Rf;
```

```
      tmax:=0;
        for z := 0 to Nc do
          if (X[Step,z]>X[Step,n]+1) then
            begin
              cc:=  X[Step,z]-X[Step,n];
              if cc<cmin then
                cmin:=cc
            end;
      for t := 1 to s do
       for z := 0 to Nc do
         if (X[Step,z]-X[Step,n]) = cmin then
            if (X[Step,z]<>X[Step,n]+1+t)  then
                begin
                   tmax :=t;
                end;
      CheckFreeCellOut:= tmax;
    end;
//*****************************************************************************
//Процедура генерує автомобілі, які рухаються по зустрічній смузі
procedure GenerateApprouching;
var yy : integer;
  begin
    Vy[step,0]:=random(randomcoordinate)+randomspeed;
    for yy := 1 to Na do
        Vy[step,yy]:=Vy[step,yy-1]- random(randomcoordinate);
    Y[step,0]:=random(randomspeed)-randomspeed;
    for yy := 1 to Na do
        Y[step,yy]:=Y[step,yy-1]+random(2*randomcoordinate);
  end;
//*****************************************************************************
//Процедура генерує нові автомобілі, які потрапляють в поле зору спостерігача
procedure GenerateNew;
  begin
    if X[step,0]<>0 then
    begin
      for I := 1 to Nc do
        begin
          X[step,i]:=X[step,i]-X[step,0];
        end;
      X[step,0]:=0;
    end;

    for i := 1 to Nc do
      begin
          if X[step,i]>Rf then
            begin
              X[step,i]:=Rb;
              Vi[step,i]:= Vdo; //+ random(4);
              //Vd[i]:= Vdo + random(4);
              DeltaV[step,i]:= Vi[step,i]-Vd[i]
            end;
          if X[step,i]<Rb then
            begin
              X[step,i]:=Rf;
              Vi[step,i]:= Vdo;// - random(4);
              //Vd[i]:= Vdo - random(4);
              DeltaV[step,i]:= Vi[step,i]-Vd[i]
            end;
      end;
  end;
//*****************************************************************************
procedure RelativeTransmissionLeft(var z : integer);
var jj,jmax,zj :integer;
begin
  for jj:=0 to Nc do             //занулення початкового масиву DeltaX
     DeltaX[jj]:=0;
  jmax:= Vi[step,z]-Vdo;
    if jmax<0 then
      for  jj:=1 to (-jmax) do
        begin
         X[step,z]:= X[step,z]-1;
```

```
          DeltaX[z]:=DeltaX[z]-1;
          //Vi[step,z]:=Vi[step,z]-1;
           for zj := Nc downto 0 do
             begin
               if ((X[step,zj]=X[step,z]) and (zj<>z)) then
                  DeltaX[zj]:=DeltaX[zj]-1
             end;
         end;
      for jj := Nc downto 0 do
        begin
          if ((DeltaX[jj]<0) and (jj<>z)) then
           begin
             X[step,jj]:=X[step,jj]+DeltaX[jj];
             Vi[step,jj]:= Vi[step,z];
             DeltaV[step,jj]:= Vd[jj]-Vi[step,jj];
           end;
        end;
       for jj := 0 to Nc do
         DeltaV[step,jj]:= Vd[jj]-Vi[step,jj];
end;
//*****************************************************************************
procedure TForm1.ButtonPress(Sender: TObject);
var Xmin : integer;
    tt   : integer;
 begin
   assignfile(F2,File2);
   rewrite(f2);
   append(f2);
 j:=0;
 for i:=1 to Nc do
    begin
      X[0,i]:=0;
      Vd[i]:=0
    end;
   assignFile(F1,file1);
   reset(F1);
   for i:=0 to Nc do
      read(F1, X[0,i]);
   for i := 1 to NumRow do
       readln(F1);
   for i := 0 to Nc do
      read(F1,Vd[i]);
   CloseFile(F1);
   Initial;
   writeln(f2,' X0,  X1,  X2, X3,  X4,  X5,  X6,  X7,  X8');
   //Початок основного циклу
   for step := 0 to S do
  BEGIN
   writeln(f2,'step ', inttostr(step),' ');
   if step>0 then
    begin
      X[step]:=X[step-1];
      Vi[step]:=Vi[step-1];
      DeltaV[step]:=DeltaV[step-1];
    end;
   GenerateApprouching;                          //додає нові авто  на зустрічній
   Acseleration:=0;
   for i := Nc downto 0 do
    if (Vd[i]-Vi[step,i]<0) then
        CheckBracking(i);                          //гальмування
   for i := Nc downto 0 do
     if DeltaV[Step,i]>0 then
       begin
         if CheckFreeCell(i)< jxmax then
            acseleration:= CheckFreeCell(i)         //прискорення
            else
            acseleration:=jxmax;
         X[step,i]:=X[step,i]+acseleration;
         Vi[step,i]:= Vi[step,i]+ acseleration;
         DeltaV[step,i]:=DeltaV[step,i]- acseleration
       end;
```

```
   Xmin:=Rf;
   for i := Nc downto 0 do
     if DeltaV[step,i]>1 then
      if CheckFreeCellOut(i,DeltaV[step,i])>1 then
       begin
          OutRunSteps:= OutRunning(i);             //обгін
          X[Step,i]:=X[Step,i]+OutRunSteps;
          for ii := 0 to Nc do
            if (X[Step,ii]-X[Step,i]>0) then
              if (X[Step,ii]-X[Step,i]<Xmin) then
                begin
                  Xmin:=X[Step,ii]-X[Step,i];
                  tt:=ii
                end;
           begin
             if (i=tt) then
               if Xmin>=2 then
                begin
                    Vi[Step,i]:=Vi[Step,i]+OutRunSteps;
                    DeltaV[Step,i]:=DeltaV[Step,i]- OutRunSteps
                end
                    else
                begin
                    Vi[Step,i]:=Vi[Step,tt];
                    DeltaV[Step,i]:=0
                end;
           end;
       end;
   for i := Nc downto 1 do              //рух зі сталою швидкістю вліво
       if Vi[step,i]<Vdo then
       RelativeTransmissionLeft(i);
   for i := Nc downto 1 do             //рух з сталою швидкістю вправо
     if Vi[step,i]>Vdo then
       RelativeTransmission(i);

   GenerateNew;
   for i := 0 to Nc do
     write(f2, floattostr(X[step,i]),'  ');
     writeln(f2);
   for i := 0 to Nc do
     write(f2,inttostr(Vi[step,i]),'  ');
     writeln(f2);
   for i := 0 to Nc do
     write(f2,inttostr(Vd[i]),'  ');
     writeln(f2);
  END;

   //writeln(f2,'step,  deltaVc,  deltaVo');
   //writeln(f2,'deltaVsum  ', ' deltaVosum ');
   deltaVsum:=0;
   deltaVosum:=0;
   for step:= 0 to S do
   begin
     deltaVc:=0;
     for j:=1 to Nc do
       deltaVc:=deltaVc+(Vdo-Vi[step,j]);
     deltaVsum:=deltaVsum+deltaVc;
     deltaVosum:=deltaVosum + deltaV[step,0];
     //writeln(f2,      inttostr(step),'            ',inttostr(deltaVc),'           ',
inttostr(deltaV[step,0]))
   end;
   //writeln(f2);
   //writeln(f2, floattostr(deltaVsum/(S*Nc)),'    ',floattostr(deltaVosum/S));
   closefile(f2);
   beep;
 end;
END.
```

Додаток Е Початкові дані для імітаційного моделювання транспортного потоку на магістралі

Таблиця Е.1

Приклад рядів підготовлених початкових даних для щільності потоку 25 авто/км

№ п/п	$\overline{V}$	η_V	σ_V	Δx_{av}	ΔV_{av}	№ п/п	$\overline{V}$	η_V	σ_V	Δx_{av}	ΔV_{av}
1	25,000	0,000	0,0000	0,0000	-5,000	14	19,750	0,203	1,2383	1,0313	0,250
2	24,938	0,040	0,2500	0,1172	-4,938	15	19,250	0,208	1,2383	1,0313	0,750
3	24,625	0,081	0,6191	0,5156	-4,625	16	18,750	0,213	1,2383	1,0313	1,250
4	24,375	0,082	0,8062	0,7031	-4,375	17	18,250	0,219	1,2383	1,0313	1,750
5	24,063	0,125	0,9979	0,8203	-4,063	18	17,750	0,225	1,2383	1,0313	2,250
6	23,688	0,127	1,1383	0,9766	-3,688	19	17,250	0,232	1,2383	1,0313	2,750
7	23,250	0,172	1,2383	1,0313	-3,250	20	16,750	0,239	1,2383	1,0313	3,250
8	22,750	0,176	1,2383	1,0313	-2,750	21	16,313	0,184	1,1383	0,9766	3,688
9	22,250	0,180	1,2383	1,0313	-2,250	22	15,938	0,188	0,9979	0,8203	4,063
10	21,750	0,184	1,2383	1,0313	-1,750	23	15,625	0,128	0,8062	0,7031	4,375
11	21,250	0,188	1,2383	1,0313	-1,250	24	15,375	0,130	0,6191	0,5156	4,625
12	20,750	0,193	1,2383	1,0313	-0,750	25	15,188	0,066	0,4031	0,3047	4,813
13	**20,250**	**0,198**	**1,2383**	**1,0313**	**-0,250**	26	15,063	0,066	0,2500	0,1172	4,938

Додаток Є Результати імітаційного моделювання магістрального руху

Таблиця Є.1 Результати моделювання

№зам	поч	кін	№ авто	від	до
2	153,4	156,2	1	2	13
40	3	4,8	2	2	4
39	9,1	11,6	2	5	2
38	11,6	13,8	2	2	3
36	23,7	26,4	2	8	2
35	28,8	33,9	2	6	8
34	37	40,2	2	9	2
33	42,6	47,7	2	6	8
32	52,2	54,5	2	4	3
31	59,1	61,5	2	6	2
30	63,3	65,1	2	4	2
28	68,3	71,4	2	9	8
26	84,1	87,3	2	2	9
21	93	97,9	2	5	6
20	100,3	103,1	2	2	13
19	105,9	108,6	2	2	8
18	111,3	115,8	2	2	7
12	117,8	122,9	2	8	6
8	128	133,3	2	8	5
10	129,3	135,7	2	10	6
7	137,2	140,5	2	15	5
29	67,8	73,3	3	8	13
3	150,6	153,4	3	13	2
37	18,5	21	4	5	2
6	143	145,4	4	2	6
4	12	16,7	5	3	5
5	16	20,7	5	5	3
11	77,7	84,5	5	15	9
9	137,2	144	5	15	9
13	5	13,1	6	15	7
14	14	20,7	7	7	3
15	13	15,2	8	3	2
16	14	18,6	9	3	6
17	12	17,8	10	3	15
27	76,1	80,1	11	2	10
22	90,5	93	11	2	5
23	10	15,6	12	6	12
24	18	22,2	13	4	6
25	16	18	14	8	7
156,2					

Продовження таблиці Є.1

№зам	поч	кін	№ авто	від	до
2	137,6	140,4	1	2	13
40	3	4,8	2	2	4
39	9,1	11,6	2	5	2
38	11,6	13,8	2	2	3
36	18,7	21,4	2	8	2
35	23,8	28,9	2	6	8
34	32	35,2	2	9	2
33	37,6	42,7	2	6	8
32	47,2	49,5	2	4	3
31	54,1	56,5	2	6	2
30	58,3	60,1	2	4	2
28	63,3	66,4	2	9	8
26	79,1	82,3	2	2	9
20	95,3	98,1	2	2	13
19	100,9	103,6	2	2	8
18	106,3	110,8	2	2	7
12	112,8	117,9	2	8	6
10	116,7	123,1	2	10	6
29	62,8	68,3	3	8	13
3	134,8	137,6	3	13	2
4	12	16,7	4	3	5
5	16	20,7	4	5	3
27	71,1	75,1	4	2	10
8	112,8	118,1	4	8	5
7	121,4	124,7	4	15	5
6	127,2	129,6	4	2	6
9	72,7	79,5	5	15	9
11	72,7	79,5	6	15	9
13	5	13,1	7	15	7
14	14	20,7	8	7	3
15	13	15,2	9	3	2
16	14	18,6	10	3	6
17	12	17,8	11	3	15
22	21	23,5	12	2	5
21	88	92,9	12	5	6
23	10	15,6	13	6	12
24	18	22,2	14	4	6
25	16	18	15	8	7
37	18,5	21	16	5	2
140,4					

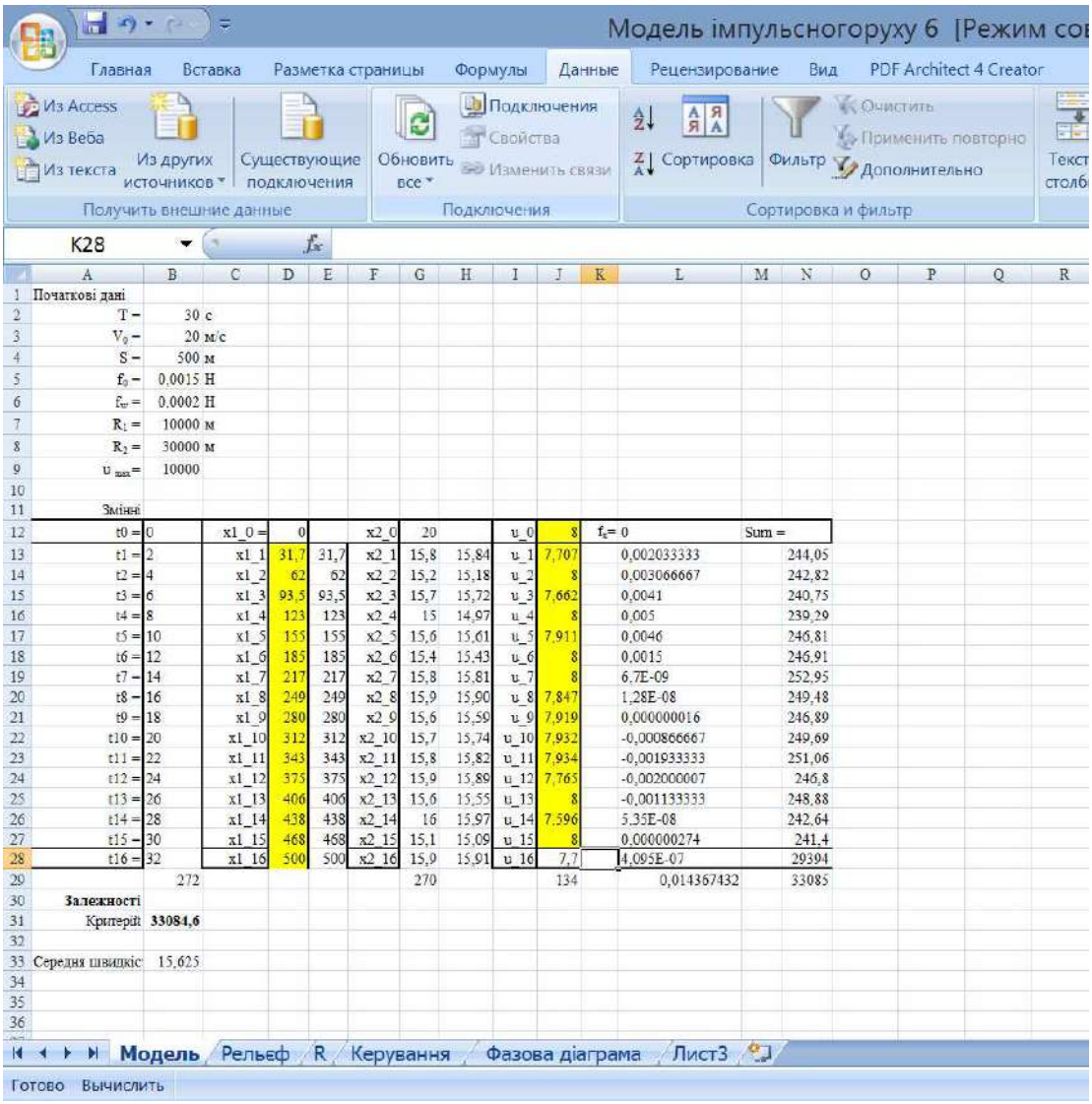
Продовження таблиці Є.1

№зам	поч	кін	№ авто	від	до
2	129,6	132,4	1	2	13
40	3	4,8	2	2	4
39	9,1	11,6	2	5	2
38	11,6	13,8	2	2	3
36	18,7	21,4	2	8	2
35	23,8	28,9	2	6	8
33	37,6	42,7	2	6	8
32	47,2	49,5	2	4	3
31	54,1	56,5	2	6	2
30	58,3	60,1	2	4	2
26	71,1	74,3	2	2	9
19	92,9	95,6	2	2	8
18	98,3	102,8	2	2	7
10	108,7	115,1	2	10	6
3	126,8	129,6	2	13	2
34	32	35,2	3	9	2
28	63,3	66,4	3	9	8
29	62,8	68,3	4	8	13
20	87,3	90,1	4	2	13
7	113,4	116,7	4	15	5
6	119,2	121,6	4	2	6
4	12	16,7	5	3	5
5	16	20,7	5	5	3
9	72,7	79,5	5	15	9
8	104,8	110,1	5	8	5
11	72,7	79,5	6	15	9
27	71,1	75,1	7	2	10
12	104,8	109,9	7	8	6
13	5	13,1	8	15	7
14	14	20,7	9	7	3
15	13	15,2	10	3	2
16	14	18,6	11	3	6
17	12	17,8	12	3	15
22	21	23,5	13	2	5
21	80	84,9	13	5	6
23	10	15,6	14	6	12
24	18	22,2	15	4	6
25	16	18	16	8	7
37	18,5	21	17	5	2
132,4					

Продовження таблиці Є.1

№зам	поч	кін	№ авто	від	до
2	127,9	130,7	1	2	13
3	125,1	127,9	5	13	2
4	12	16,7	3	3	5
5	16	20,7	3	5	3
6	117,5	119,9	4	2	6
7	96,4	99,7	4	15	5
8	104,8	110,1	5	8	5
9	5	11,8	6	15	9
10	108,7	115,1	7	10	6
11	72,7	79,5	8	15	9
12	104,8	109,9	9	8	6
13	5	13,1	10	15	7
14	14	20,7	11	7	3
15	13	15,2	12	3	2
16	14	18,6	13	3	6
17	12	17,8	14	3	15
18	98,3	102,8	5	2	7
19	92,9	95,6	2	2	8
20	87,3	90,1	4	2	13
21	80	84,9	4	5	6
22	21	23,5	15	2	5
23	10	15,6	16	6	12
24	18	22,2	17	4	6
25	16	18	18	8	7
26	71,1	74,3	4	2	9
27	69,1	73,1	7	2	10
28	63,3	66,4	2	9	8
29	62,8	68,3	2	8	13
30	58,3	60,1	2	4	2
31	54,1	56,5	2	6	2
32	47,2	49,5	2	4	3
33	37,6	42,7	2	6	8
34	32	35,2	2	9	2
35	23,8	28,9	2	6	8
36	18,7	21,4	2	8	2
37	18,5	21	15	5	2
38	11,6	13,8	2	2	3
39	9,1	11,6	2	5	2
40	3	4,8	2	2	4
130,7					

Додаток Ж Моделювання та оптимізація програми руху автомобіля при заданих дорожніх умовах



Модель імпульсногоруху 6 [Режим со

Главная | Вставка | Разметка страницы | Формулы | Данные | Рецензирование | Вид | PDF Architect 4 Creator

Из Access, Из Веба, Из текста, Из других источников, Существующие подключения, Обновить все, Подключения, Свойства, Изменить связи, Сортировка, Фильтр, Очистить, Применить повторно, Дополнительно

Получить внешние данные | Подключения | Сортировка и фильтр

K28

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Початкові дані													
2	T =	30	с											
3	V_0 =	20	м/с											
4	S =	500	м											
5	f_0 =	0,0015	Н											
6	f_w =	0,0002	Н											
7	R_1 =	10000	м											
8	R_2 =	30000	м											
9	u_{max} =	10000												
10														
11	Змінні													
12	t0 =	0	x1_0 =	0		x2_0	20		u_0	8	f_k= 0		Sum =	
13	t1 =	2	x1_1	31,7	31,7	x2_1	15,8	15,84	u_1	7,707	0,002033333		244,05	
14	t2 =	4	x1_2	62	62	x2_2	15,2	15,18	u_2	8	0,003066667		242,82	
15	t3 =	6	x1_3	93,5	93,5	x2_3	15,7	15,72	u_3	7,662	0,0041		240,75	
16	t4 =	8	x1_4	123	123	x2_4	15	14,97	u_4	8	0,005		239,29	
17	t5 =	10	x1_5	155	155	x2_5	15,6	15,61	u_5	7,911	0,0046		246,81	
18	t6 =	12	x1_6	185	185	x2_6	15,4	15,43	u_6	8	0,0015		246,91	
19	t7 =	14	x1_7	217	217	x2_7	15,8	15,81	u_7	8	6,7E-09		252,95	
20	t8 =	16	x1_8	249	249	x2_8	15,9	15,90	u_8	7,847	1,28E-08		249,48	
21	t9 =	18	x1_9	280	280	x2_9	15,6	15,59	u_9	7,919	0,000000016		246,89	
22	t10 =	20	x1_10	312	312	x2_10	15,7	15,74	u_10	7,932	-0,000866667		249,69	
23	t11 =	22	x1_11	343	343	x2_11	15,8	15,82	u_11	7,934	-0,001933333		251,06	
24	t12 =	24	x1_12	375	375	x2_12	15,9	15,89	u_12	7,765	-0,002000007		246,8	
25	t13 =	26	x1_13	406	406	x2_13	15,6	15,55	u_13	8	-0,001133333		248,88	
26	t14 =	28	x1_14	438	438	x2_14	16	15,97	u_14	7,596	5,35E-08		242,64	
27	t15 =	30	x1_15	468	468	x2_15	15,1	15,09	u_15	8	0,000000274		241,4	
28	t16 =	32	x1_16	500	500	x2_16	15,9	15,91	u_16	7,7	4,095E-07		29394	
29		272					270			134	0,014367432		33085	
30	**Залежності**													
31	Критерій	**33084,6**												
32														
33	Середня швидкіс	15,625												

Модель | Рельеф | R | Керування | Фазова діаграма | Лист3

Готово Вычислить

Рисунок Ж.1 – Початкові дані оптимізації

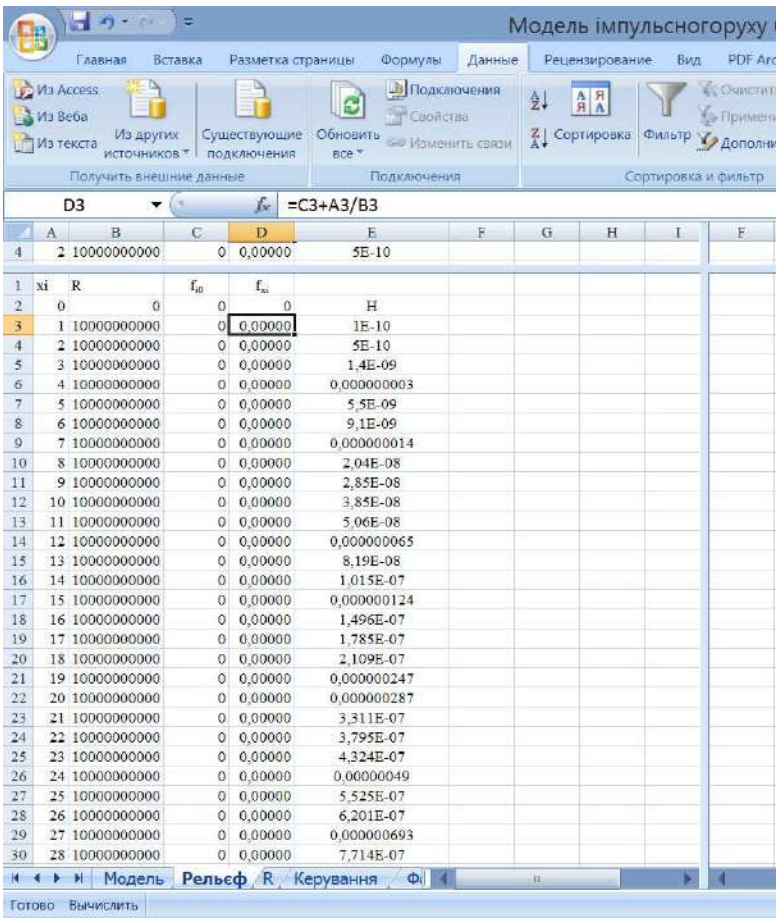


Рисунок Ж.2 – Початкові дані (задання коефіцієнта дорожнього опору)

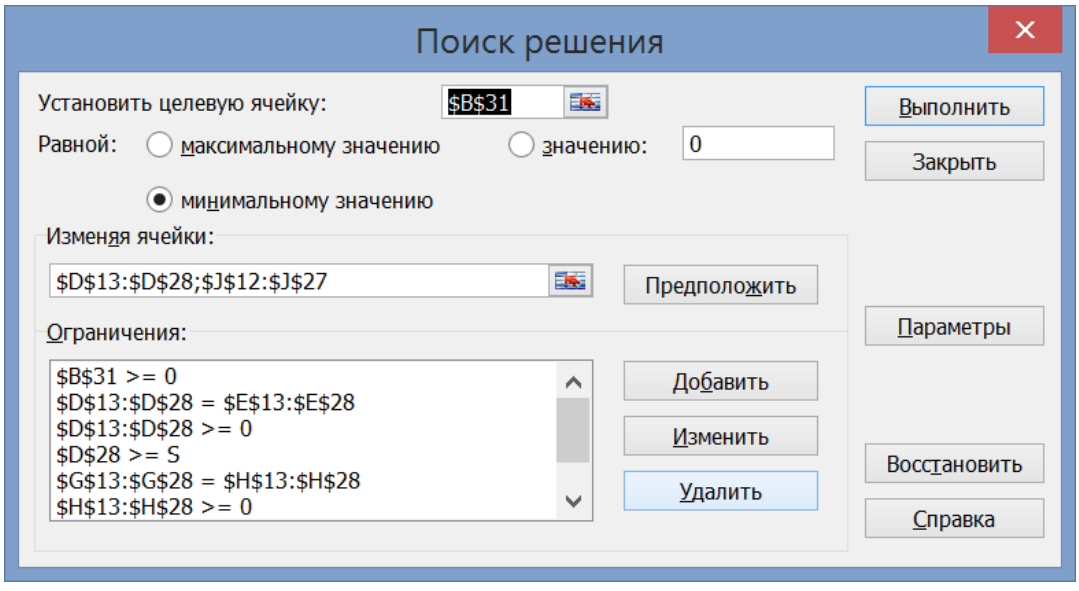


Рисунок Ж.3 – Діалогове вікно

Додаток З Лістинг програми імітаційного моделювання руху АТЗ вздовж магістралі

```
unit Imit7;
   {програма імітаційного моделювання виконання графіка руху}
interface

uses
  SysUtils,  Types,  Classes,  Variants,  QTypes,  QGraphics,  QControls,
QForms,
  QDialogs, QStdCtrls;
const
  Lmax = 5000;
  File1 = 'D:\Delphi\ImitCongestion\I14.txt';
  File2 = 'D:\Delphi\ImitCongestion\V14.txt';
  File3 = 'D:\Delphi\ImitCongestion\T14.txt';
  variant = 1;
type
 TForm1 = class(TForm)
    Ok  : TButton;
  procedure ClickOn1(Sender: TObject);

  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
procedure InitFiles;
procedure init;
procedure readV;
procedure GenerateVi;
procedure GenerateVmax(io : integer);
procedure SpeedChoise(zz:integer);
function  MinSpeed (x1 :integer): real;
function  CalculateTz(x1:integer):real;
function  GenerateVz(zx:integer):real;
function  CalculateTx(x2:integer):real;
Procedure ImitCycleI;
Procedure ImitCycleII(cc : integer);
Procedure CalculateSpeed;
Procedure CorrectionV(var Xi : integer);
Procedure Outprint;
procedure GenerateVWmax (ww : integer);
//*********************************************
var
                W       : integer;
                R,Dsum  : real;
                  Form1 : TForm1;
V,Vmax,VWmax, Vi, Vz,deltaT,
             Tz,Tx,Taver : array[0..Lmax] of real;
                 z,i,j,k : Integer;
       f1,f2,f3          : textfile;
       Vaver,Tmax,LmaxDouble,
       Viaver, Vmaxaver,Vzaver,
       Vrealaver         : real;
       Vdes              :  real;
       Di                : array [1..Lmax] of real;
 frase1,frase2,frase3    : string;
                 L,step: integer;

  implementation
```

```
{$R *.xfm}
//*********************************************************************
procedure InitFiles;
  begin
    Assign(F2,file2);
    Rewrite(f2);
    Close(f2);
    Assign(F3,file3);
    Rewrite(f3);
    Close(f3);
  end;
//*********************************************************************
procedure Init;
 var x : integer;
{процедура встановлює початкові значення швидкостей і часу}
   begin
     Vdes:=1;
     Vi[0]:=1;
     Vz[0]:=1;
     Vmax[0]:=1;
     VWmax[0]:=1;
     Tx[0]:=0;
     Tz[0]:=0;
     V[0]:=1;
     for x:=1 to Lmax do
      begin
        V[x]:=0;
        Vmax[x]:=0;
        VWmax[x]:=0;
        Vi[x]:=0;
        Vz[x]:=0;
        Tz[x]:=0;
        deltaT[x]:=0;
        Tx[x]:=0;
        Taver[x]:=0;
        Di[x]:=0;
      end;
   end;
//*********************************************************************
procedure readV;
 var x, x1: integer;
 begin
   Assign(F1,file1);
   Reset(F1);
   readln(f1,frase1);
   readln(f1,frase2);
   readln(f1,frase3);
    while (not eof(f1)) do
       read(F1,x, Vi[x],Vmax[x]);
   Close(f1);
 end;

//*********************************************************************
 procedure GenerateVi;
 //Генерувати оптимальну Vi(x) на усю трасу.
 //Генерує середню швидкість вільного руху
 var zz : Integer;
 Visum : real;
 begin
    Visum:=1;
    for  zz:=0 to Lmax do
       Visum:= Visum + Vi[zz];
    Vaver:=Visum/Lmax;
```

```
    Tmax:=Lmax/Vaver;
    for zz:=1 to Lmax do
      Taver[zz]:=zz/Vaver;
 end;
//*********************************************************************
procedure GenerateVWmax (ww : integer);
   var wj  : integer;
      Xrandom : real;
   begin
     Randomize;
     for wj:=1 to W do
      begin
         //VVmax[iz]:=(Rmin+(Rmax-Rmin)*Random )/100
         Xrandom := 1-random(wj-0)/W;
         VWmax[ww]:=Vmax[ww]* Xrandom;
         ww:=ww+1;
       end;
   end;
//*********************************************************************
function CalculateTz(x1:integer): real;
//розрахунок планового часу відповідно до максимально досяжної швидкості
 var ttz : integer;
   begin
     ttz:=x1;
     CalculateTz:= Tz[ttz-1]+(1/(MinSpeed(ttz)));
   end;
//*********************************************************************
function CalculateTx(x2:integer):real;
//розрахунок дійсного часу згідно вибраної швидкості
 var ttx : integer;
   begin
     ttx:=x2;
     CalculateTx:=Tx[ttx-1]+(1/(V[ttx]));
   end;
//*********************************************************************
function GenerateVz(zx:integer):real;
// швидкість по графіку
 var jj : integer;
 begin
   jj:=zx;
   if (Tx[jj]-Taver[jj]>0) then
      deltaT[jj]:=Tx[jj]-Taver[jj];
   GenerateVz:= 1/(Tz[jj]-Tz[jj-1]+DeltaT[jj])
 end;
//*********************************************************************
procedure GenerateVmax(io : integer);
 var xb,xe,iz : Integer;
 begin
   xb:=io;
   xe:=(io+W);
    for iz:=xb to xe do
       begin
       end;
 end;
//*********************************************************************
function MinSpeed (x1 :integer): real;
  begin
    if (Vaver>VWmax[x1]) then
       MinSpeed:=VWmax[x1] else MinSpeed:=Vaver;
  end;
//*********************************************************************
Procedure SpeedChoise(zz : integer);
//Вибираємо швидкість за трьома параметрами Vi, VWmax, Vz
  var jz : integer;
```

```
  begin
    jz:=zz;
    V[jz]:=Vz[jz];
    if (Vi[jz]>Vz[jz]) then
        case variant  of
        1:  //перевага надається ощадності
                 V[jz]:=Vi[jz];
        2:  // перевага надається графіку руху
                V[j]:=Vz[j]
        end;
    if (V[jz]>VWmax[jz]) then
                   V[jz]:=VWmax[jz];
  end;
//*************************************************************************
Procedure ImitCycleI;
  var ii,cycle : integer;
  begin
    cycle :=1;
    GenerateVmax(1);
    GenerateVWmax (1);
     for ii:=1 to W do
       begin
        Tz[ii]:=CalculateTz(ii);
        Vz[ii]:=GenerateVz(ii);
        SpeedChoise(ii);
        Tx[ii]:=CalculateTx(ii);
       end;
    if Tz[W]<Tx[W] then
     CorrectionV(cycle)   //корекція швидкості відносно дійсних умов
  end;
//*************************************************************************
Procedure ImitCycleII(cc : integer);
  var iii,jk : integer;
  begin
    GenerateVmax((cc-1)*W+1);
    GenerateVWmax((cc-1)*W+1);
     for iii:=((cc-1)*W+1) to ((cc-1)*W+W) do
       begin
         Tz[iii]:=CalculateTz(iii);
         Vz[iii]:=GenerateVz(iii);
         SpeedChoise(iii);
         Tx[iii]:=CalculateTx(iii);
       end;
    jk:=cc;
    if Tz[(jk-1)*W+W]>Tx[(jk-1)*W+W] then
          CorrectionV(jk);
  end;
//*************************************************************************
Procedure CalculateSpeed;
 var si : integer;
  begin
    Viaver:= 0;
    Vmaxaver:=0;
    Vzaver:=0;
    Vrealaver:=0;
    for si:=1 to Lmax do
      begin
        Viaver:= Viaver + Vi[si];
        Vmaxaver:= Vmaxaver + Vmax[si];
        Vzaver:= Vzaver + Vz[si];
        Vrealaver:= Vrealaver+V[si];
      end;
    Viaver:= Viaver/Lmax;
    Vrealaver:=Vrealaver/Lmax;
```

```
        Vmaxaver:= Vmaxaver/Lmax;
        Vzaver:=Vzaver/Lmax
      end;
    //*********************************************************************
    Procedure CorrectionV(var Xi : integer);
       var Dmax   : real;
           im,ddi : integer;
     label L1;
     function MaxD : integer;
      var cci : integer;
      //знаходимо мінімальний потенціал
        begin
          MaxD:=0;
          for cci:=(Xi*W) to (Xi*W+W) do
          if ((Di[cci]<Dmax) and (Di[cci]>0)) then
                begin
                  Dmax:=Di[cci];
                  MaxD:=cci;
                end;
        end;
    //Коригування швидкості задля дотримання розкладу руху в межах Xi-го ін-
тервалу
     begin
        Dmax:=0;
        Dsum:=0;
        Vdes:=W/(Tz[W*Xi+W]-Tx[Xi*W]);      //бажана швидкість в кінці інтер-
валу
      //ShowMessage('бажана швидкість в кінці інтервалу '+ IntToStr(Xi) +' =
'+ FloatToStr(Vdes));
        if Tz[Xi*W+W]>Tx[Xi*W+W] then
        for ddi:=Xi*W to (Xi*W+W) do
          if V[ddi]<Vmax[ddi] then
          Begin
            begin
               Di[Xi]:= Vmax[ddi]-V[ddi];
               Dsum:=Dsum+Di[ddi];
            end;
     L1:    im:=MaxD;
            if im >0 then
            begin
              V[im]:=V[im]+ Di[im];
              Di[im]:=0;
              goto L1;
            end;
         end;
     end;
    //*********************************************************************
    Procedure Outprint;
     var kk   : integer;
         Vdev : array[1..Lmax] of real;
         Vdevsum : real;
       begin
         for kk:=1 to Lmax do
         Vdev[kk]:=0;
         Vdevsum :=0;
         Assign(F2,file2);
         Append(f2);
         Assign(F3,file3);
         Append(f3);
         {writeln(f2,'Максимальний час = ',Tx[Lmax]:2:2);
         writeln(f2,'Середня дійсна швидкість ',Vrealaver:2:2);
         writeln(f2,'Середня швидкість по дорожніх обмеженнях ',Viaver:2:2);
         writeln(f2,'Середня    швидкість    по    транспортних    обмеженнях
',Vmaxaver:2:2);
```

```
          writeln(f2,'Середня планова швидкість по усіх обмеженнях
',Vzaver:2:2);
          writeln(f2,'Кількість інтервалів ',J);
          writeln(f2,'Довжина інтервалу ',W);
          writeln(f2,frase1);
          writeln(f2,frase2);
     writeln(f2,'************************************************************');
          writeln(f2,'x  Vi    Vmax    Vz     V    VW    Tx');
          //writeln(f1,'x  Vi    Vmax');}
          for kk:=1 to Lmax do
          begin
            Vdev[kk]:= vi[kk]-v[kk];
           //   writeln(f2,kk,'       ',vi[kk]:2:2,'          ',vmax[kk]:2:2,'
',vz[kk]:2:2,'      ',v[kk]:2:2,'     '{,Vdev[kk]:4:2,'     '},VWmax[kk]:2:2,'
',tx[kk]:2:2);
            //writeln(f1,kk,'  ',vi[kk]:2:2,'   ',vmax[kk]:2:2);
            Vdevsum:=Vdevsum+ ABS(Vdev[kk]);
          end;
          //Close(f1);
          //writeln(f2,'Сумарне відхилення від програми руху - ',Vdevsum:2:2);
          //writeln(f3,'крок   Tx    Vdevsum');
          writeln(f3,step,'   ',W,'   ',Tx[Lmax]:2:0,'   ',Vdevsum:2:0);
          Close(f2);
          Close(f3);
        end;
     //*************************************************************************
     procedure TForm1.ClickOn1(Sender: TObject);
     var fk,ji : integer;
     begin
      InitFiles;
      W:=5010;
       for step:=1 to 500 do
      BEGIN
      W:=W-10;
      Init;
      ReadV;
      R:=1;
      LmaxDouble:=Lmax;
      GenerateVi;
      j:=1;
      for fk:=1 to Lmax do
        begin
         if ((LmaxDouble-W)>0) then
          begin
            LmaxDouble:=LmaxDouble - W;
            j:=j+1;
          end;
        end;
      L:=J*W;
           //перший цикл
      ImitCycleI;
          //цикл по інтервалах
      if J>1 then
        for ji:=2 to J do
          ImitCycleII(ji);
      CalculateSpeed;
      Outprint;
      END;
      Beep;
      close;
     end;

     end.
```

Додаток К Залежності показників якості контролю швидкістю АТЗ на магістралі при різних наборах вхідних даних

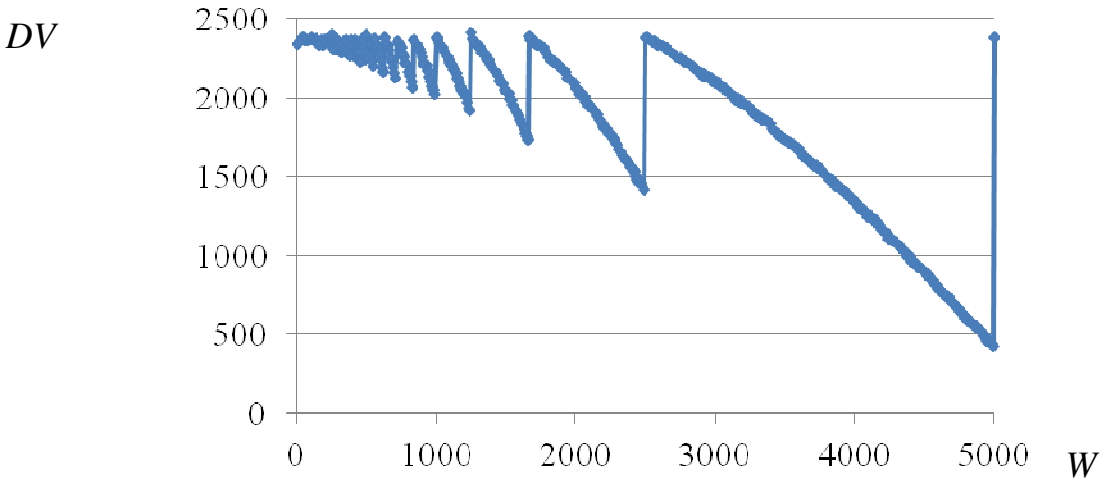


Рисунок К.1 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми DV від розміру горизонту прогнозування W при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,004V_{max}$

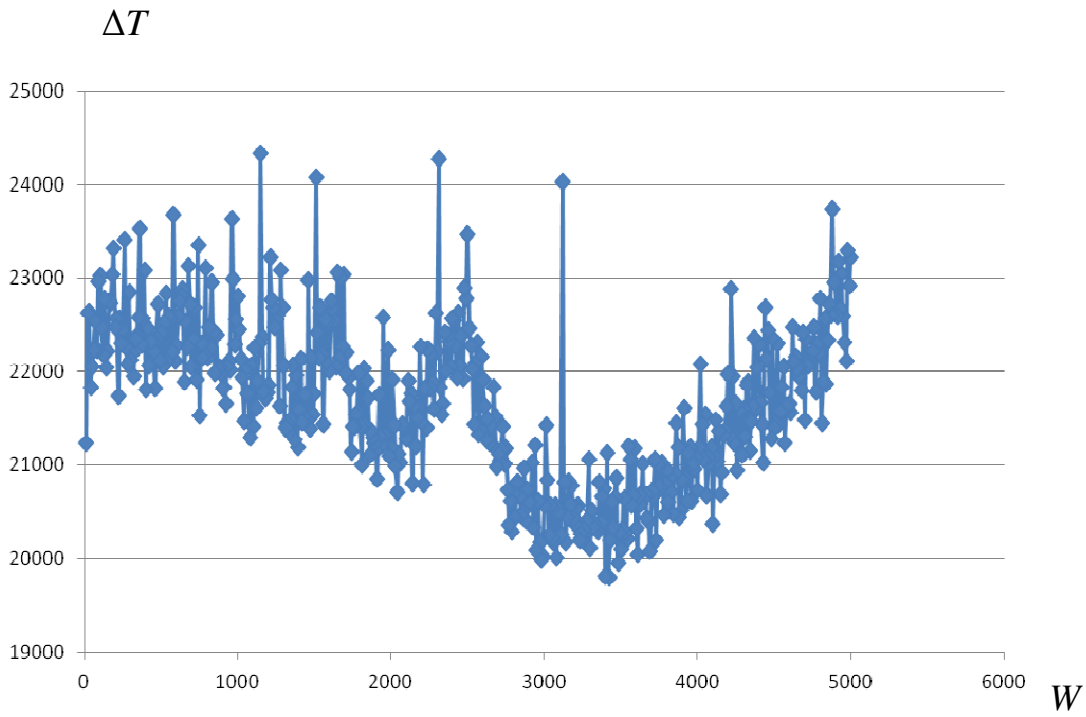


Рисунок К.2 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми DV відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT від розміру горизонту прогнозування W при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,004V_{max}$

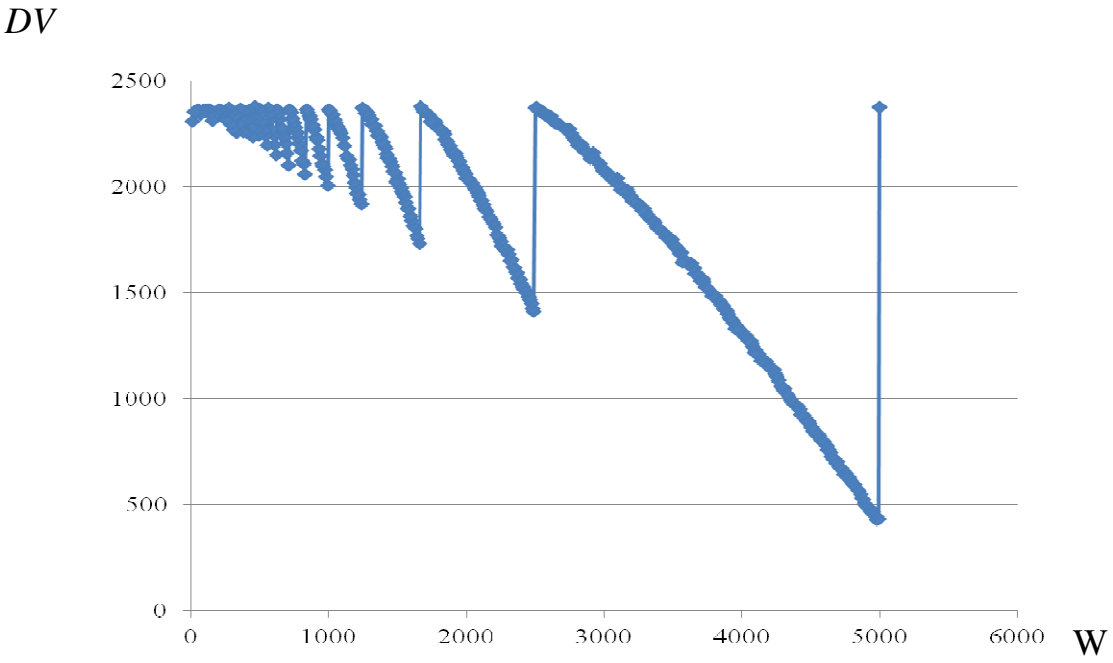


Рисунок К.3 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми DV від розміру горизонту прогнозування W при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0033V_{max}$

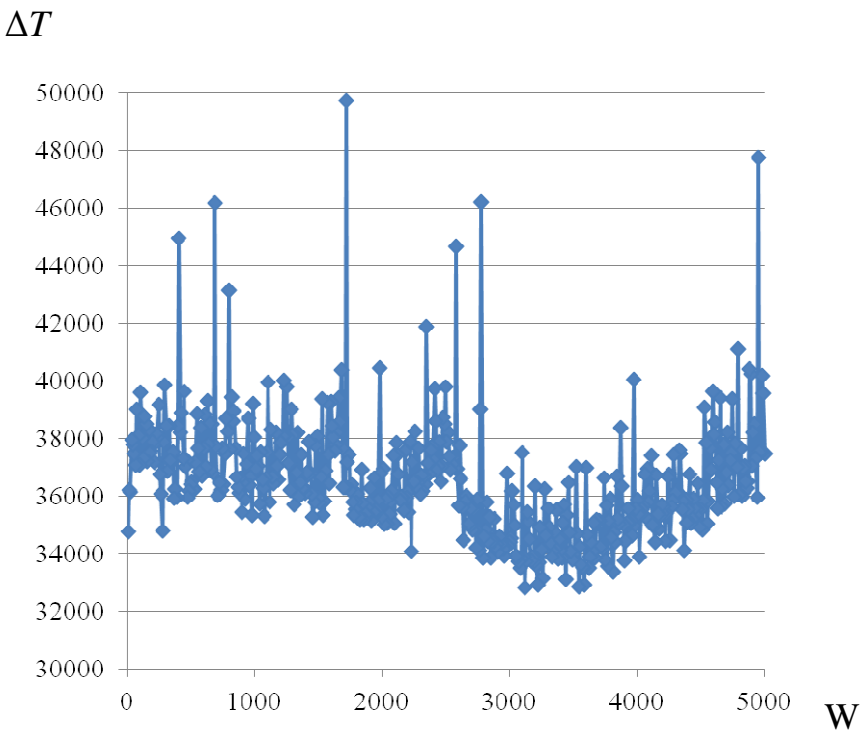


Рисунок К.4 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми DV відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT від розміру горизонту прогнозування W при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0033V_{max}$

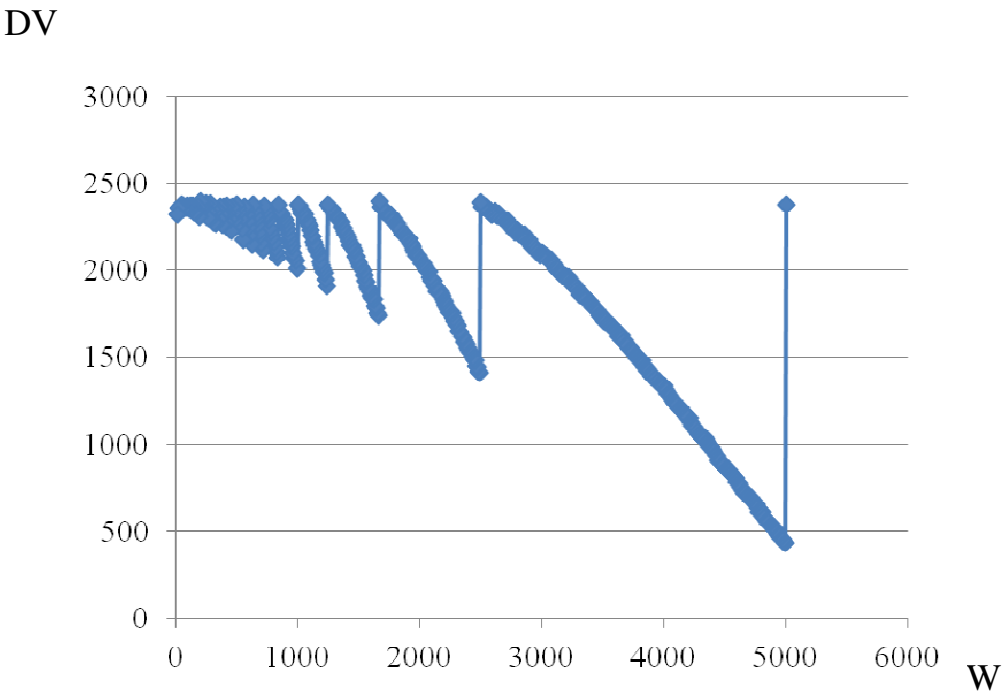


Рисунок К.5 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* від розміру горизонту прогнозування *W* при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0025V_{max}$

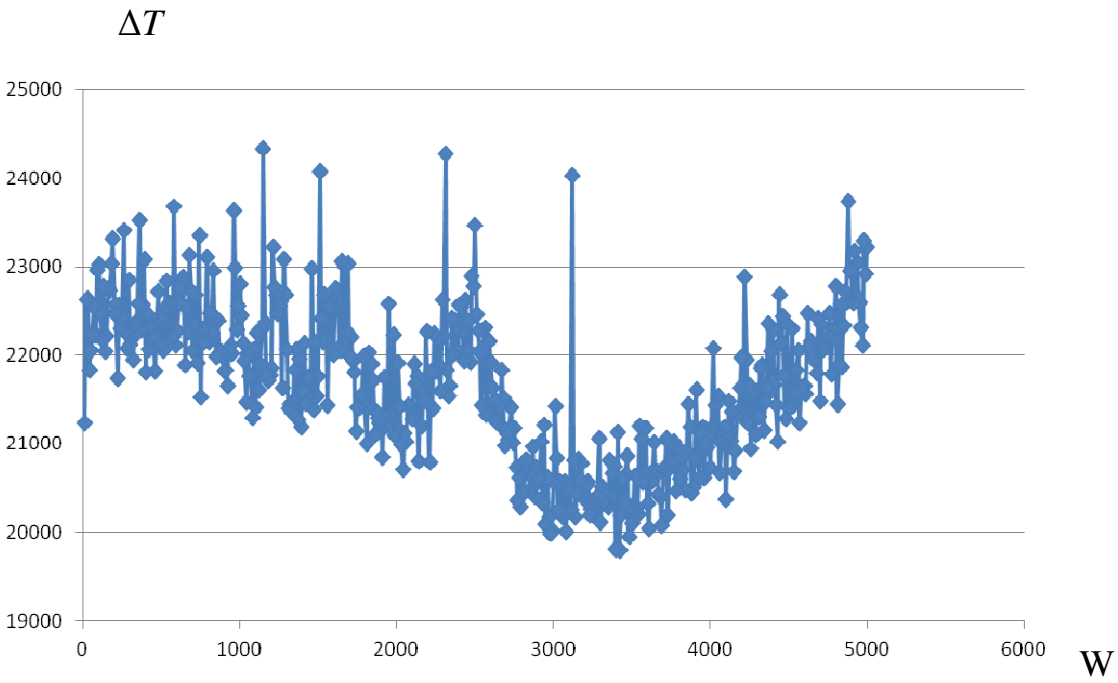


Рисунок К.6 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT від розміру горизонту прогнозування *W* при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0025V_{max}$

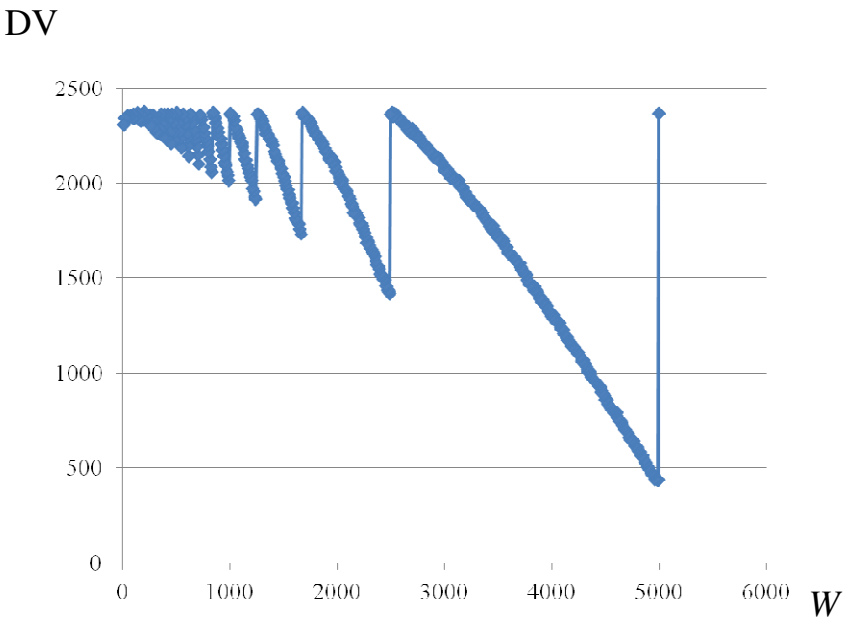


Рисунок К.7 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми DV від розміру горизонту прогнозування W при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0016V_{max}$

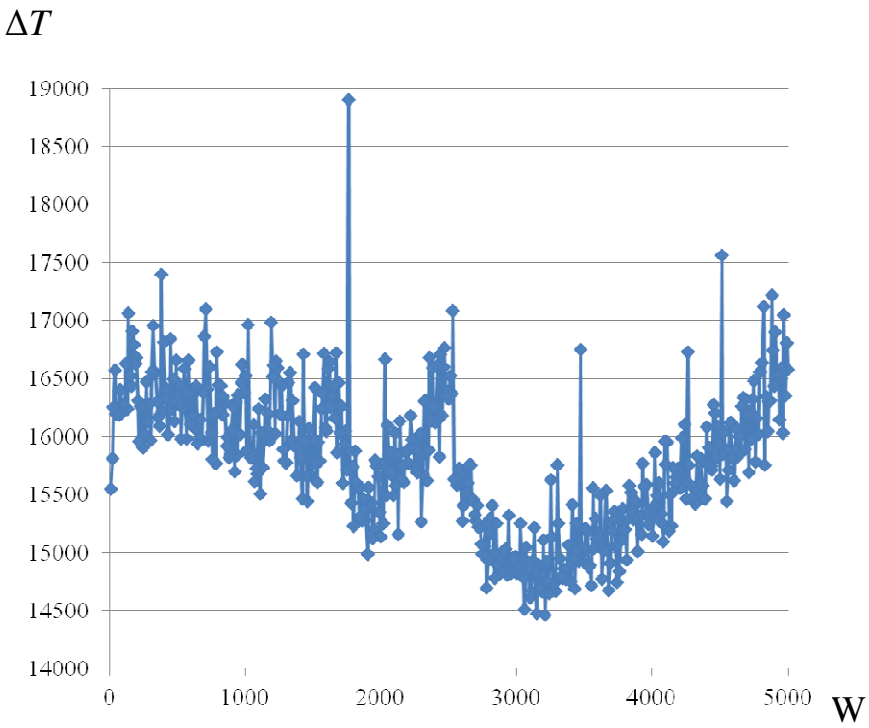


Рисунок К.8 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми DV відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT від розміру горизонту прогнозування W при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0016V_{max}$

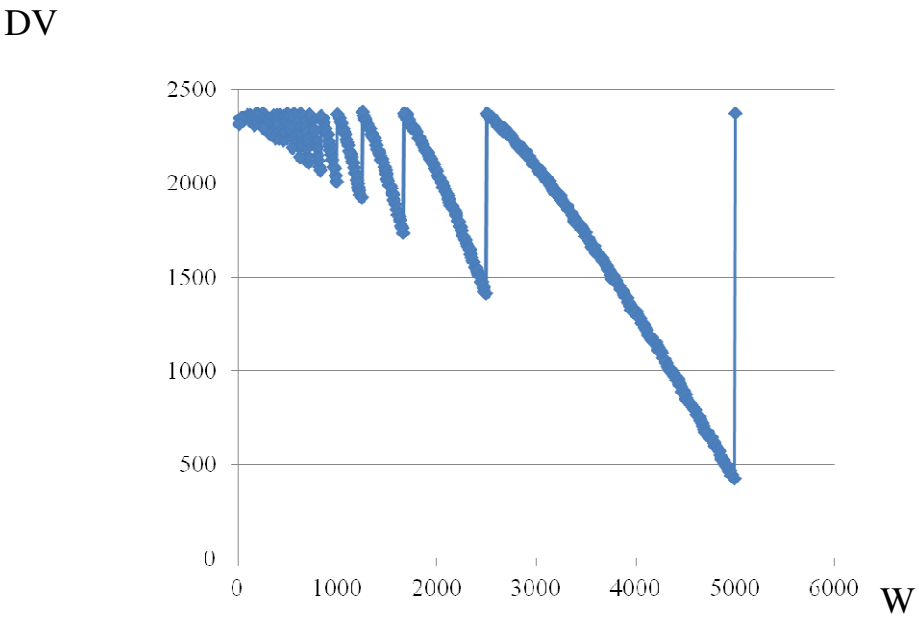


Рисунок К.9 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* від розміру горизонту прогнозування *W* при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0008V_{max}$

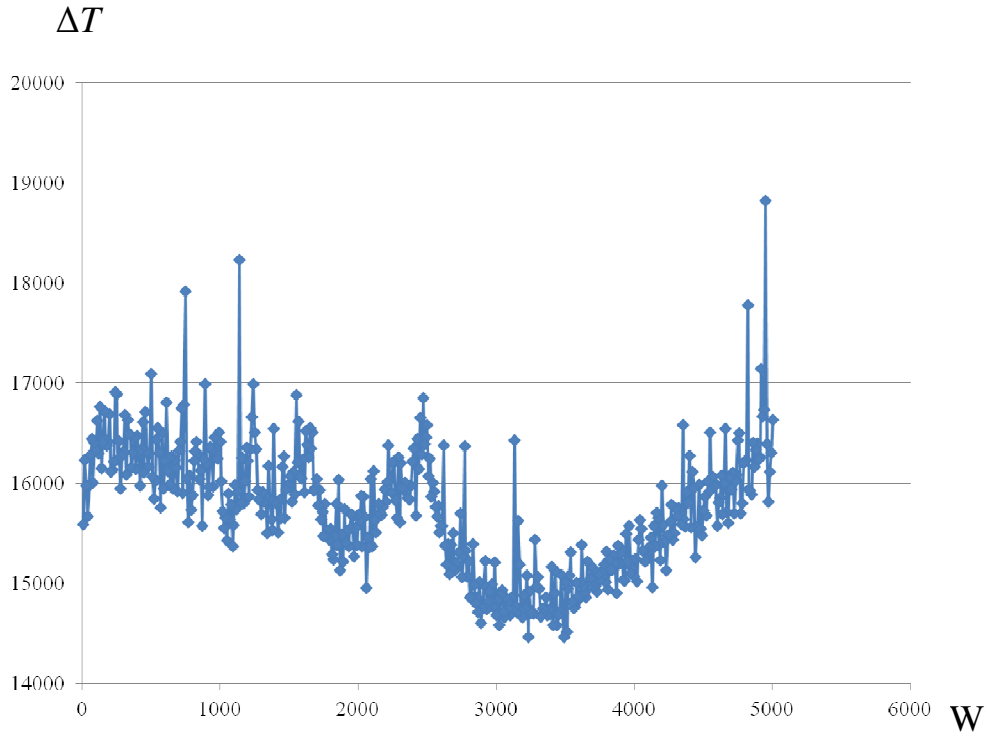


Рисунок К.10 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT від розміру горизонту прогнозування *W* при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0008V_{max}$

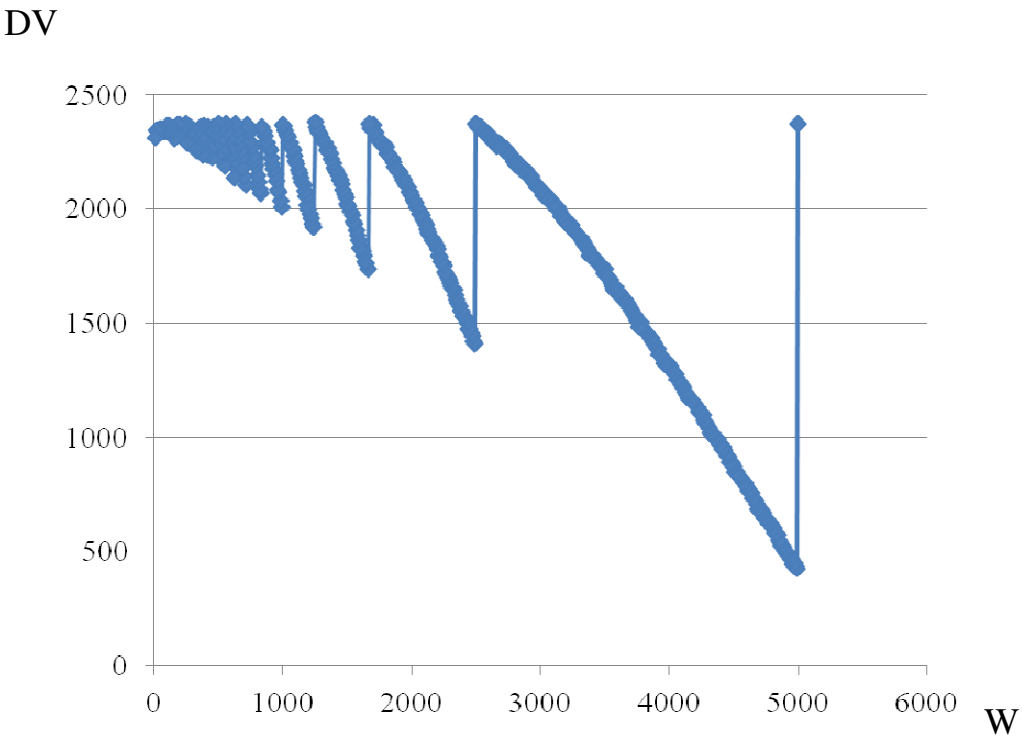


Рисунок К.11 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* від розміру горизонту прогнозування *W* при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0004V_{max}$

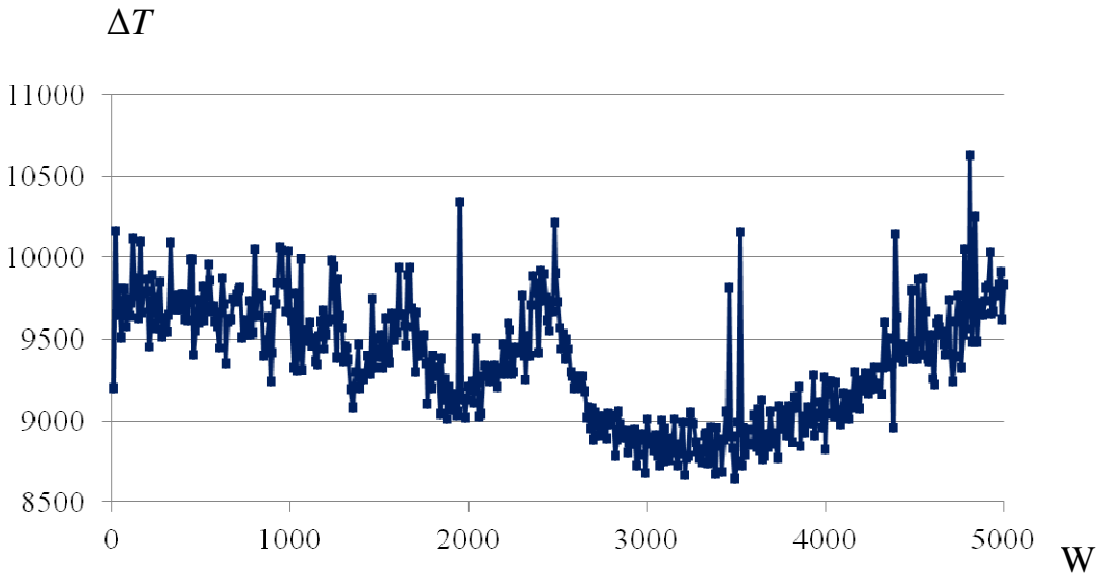


Рисунок К.12 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT від розміру горизонту прогнозування *W* при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0004V_{max}$

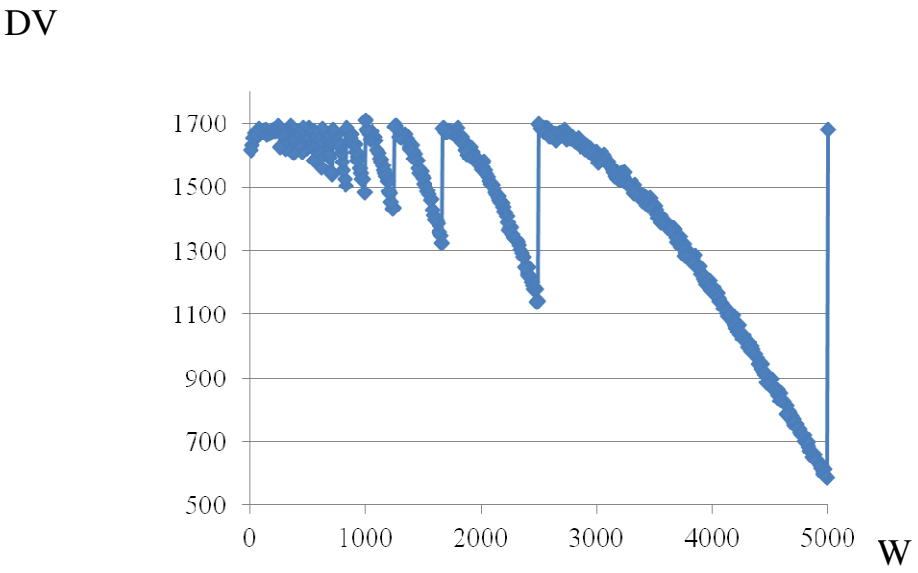


Рисунок К.13 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* від розміру горизонту прогнозування *W* при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0002V_{max}$

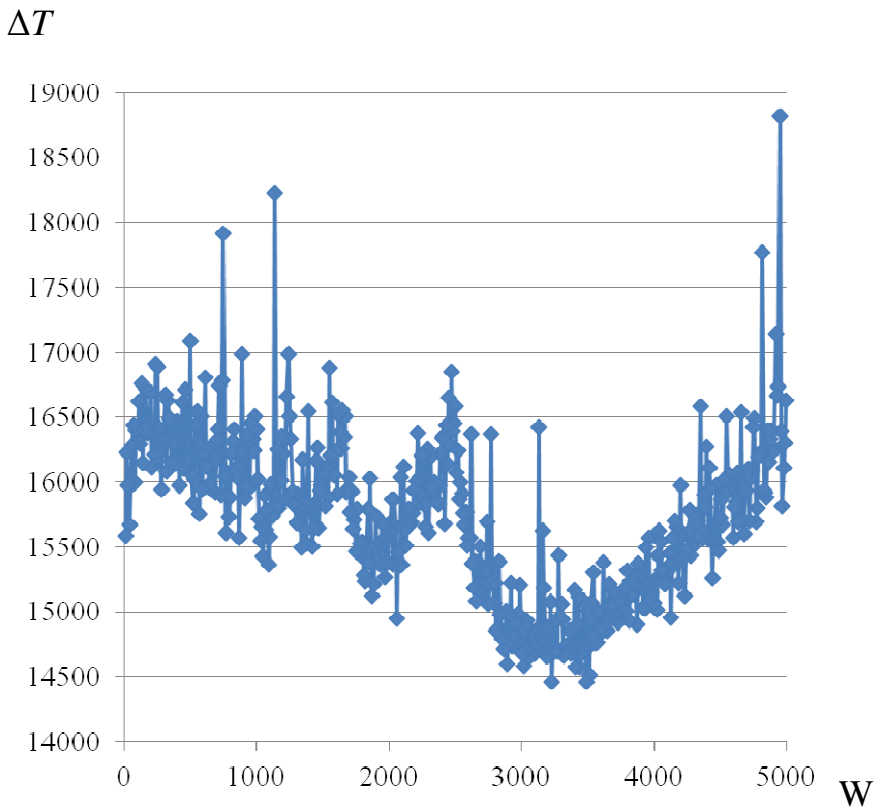


Рисунок К.14 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT від розміру горизонту прогнозування *W* при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0002V_{max}$

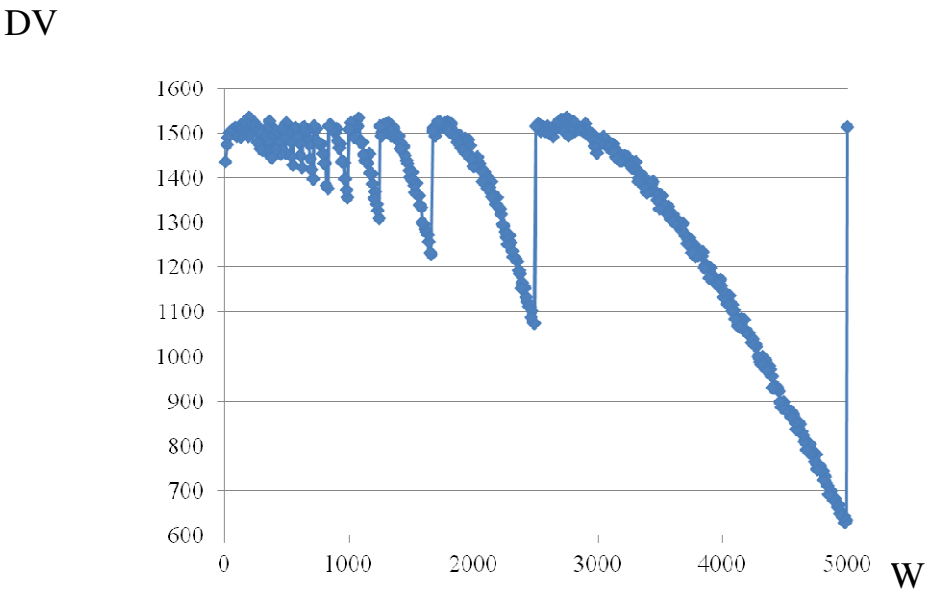


Рисунок К.15 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* від розміру горизонту прогнозування *W* при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0002V_{max}$

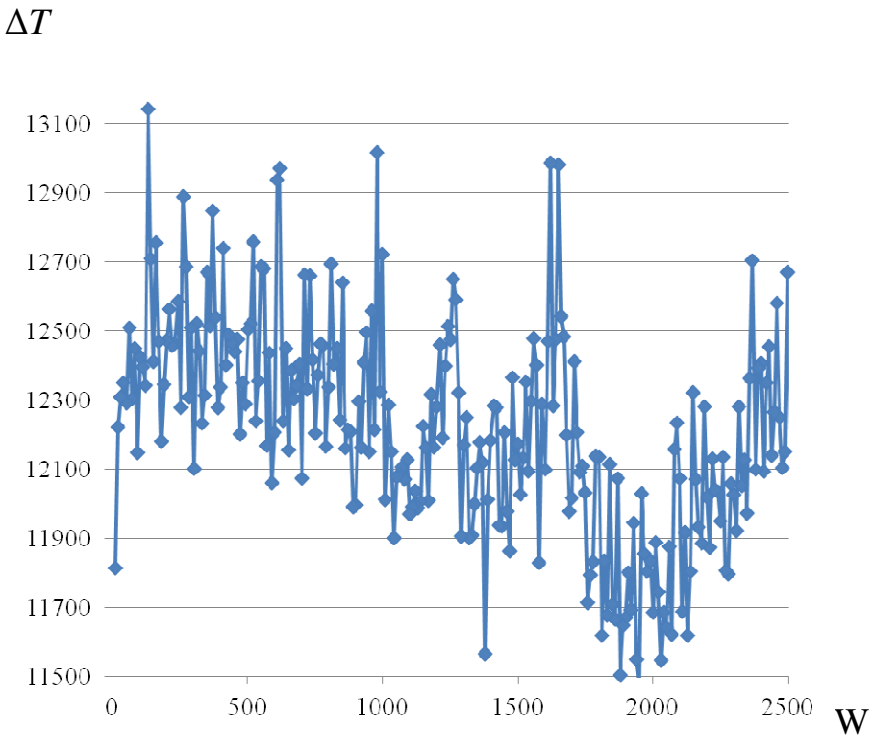


Рисунок К.16 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT від розміру горизонту прогнозування *W* при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,5V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0002V_{max}$

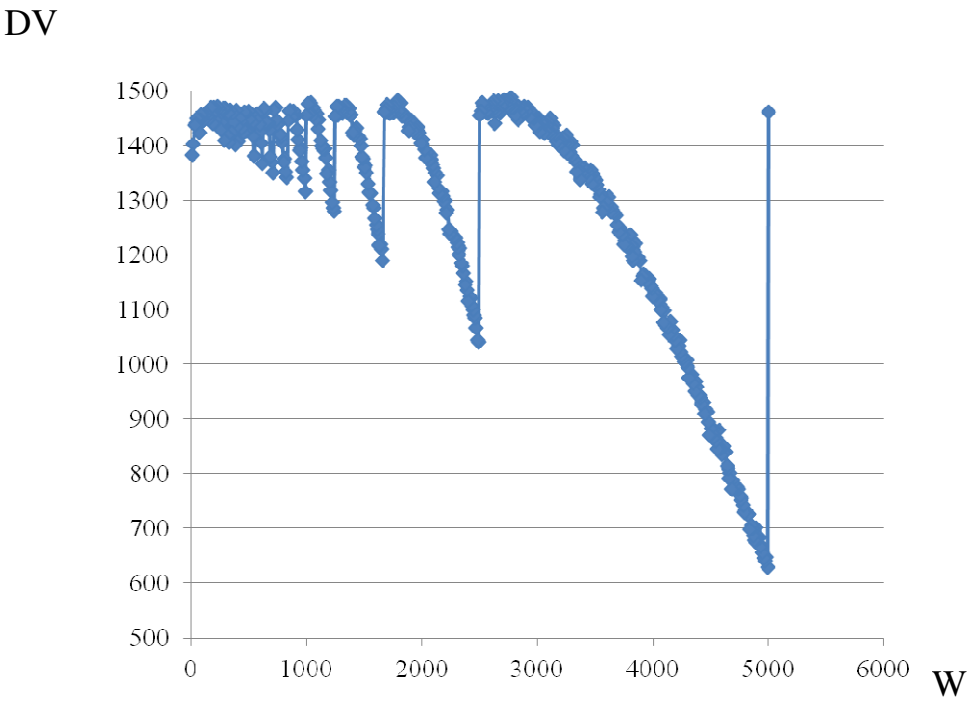


Рисунок К.17 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* від розміру горизонту прогнозування *W* при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,7V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0024V_{max}$

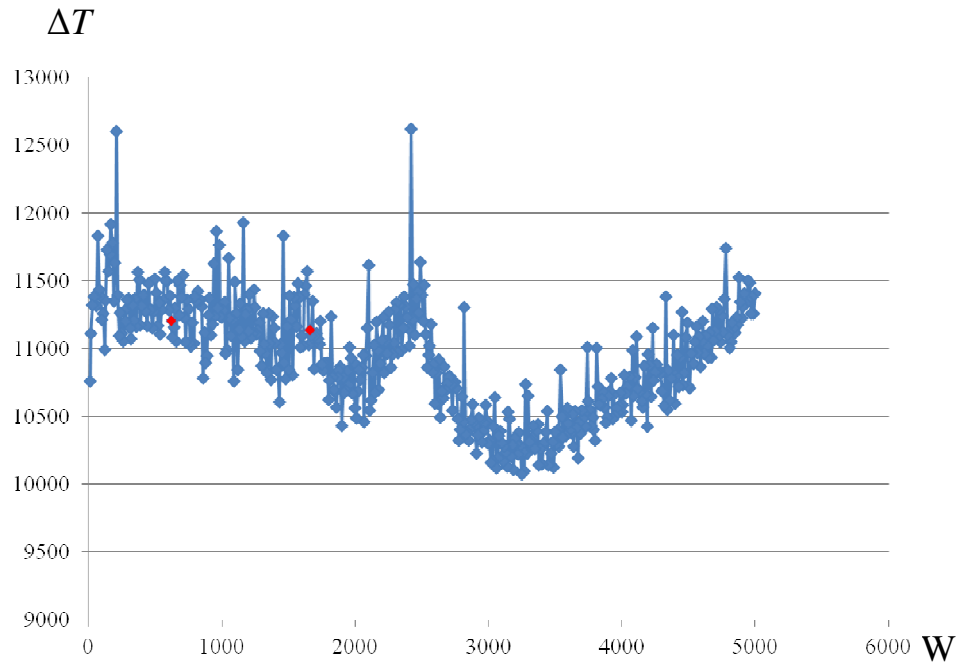


Рисунок К.18 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT від розміру горизонту прогнозування *W* при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,7V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,002V_{max}$

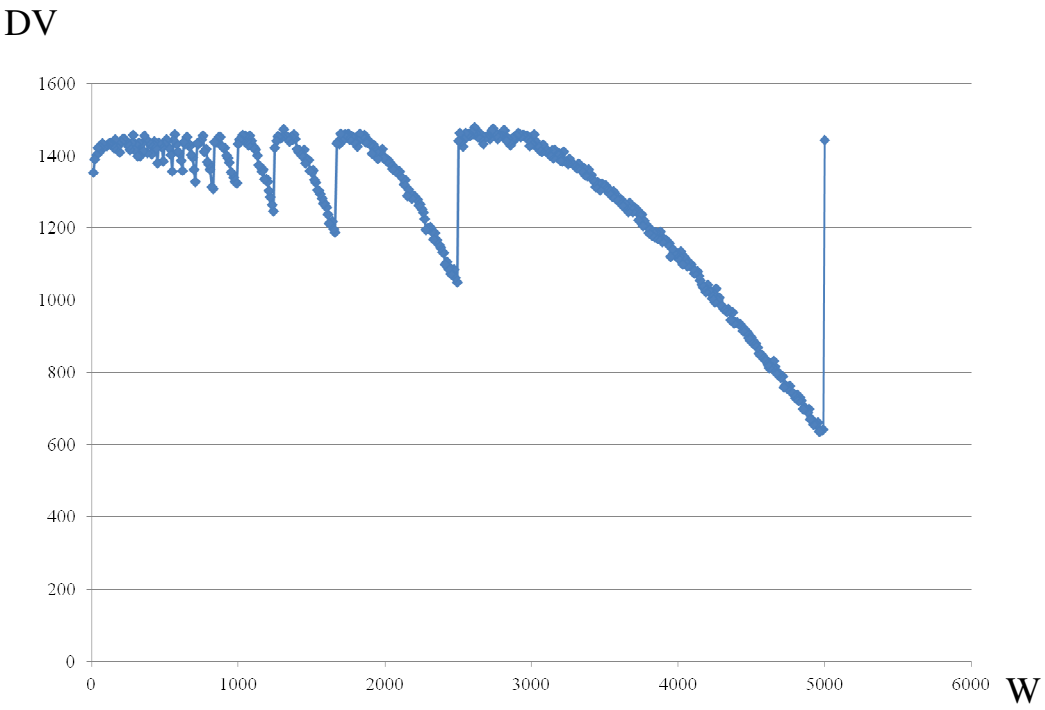


Рисунок К.19 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми DV від розміру горизонту прогнозування W при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,75V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,002V_{max}$

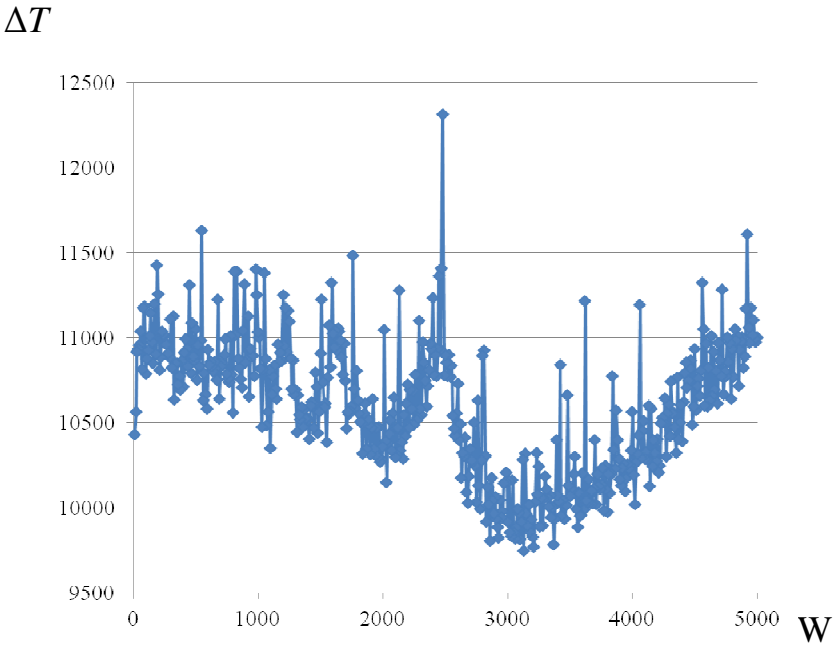


Рисунок К.20 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми DV відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT від розміру горизонту прогнозування W при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,75V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,002V_{max}$

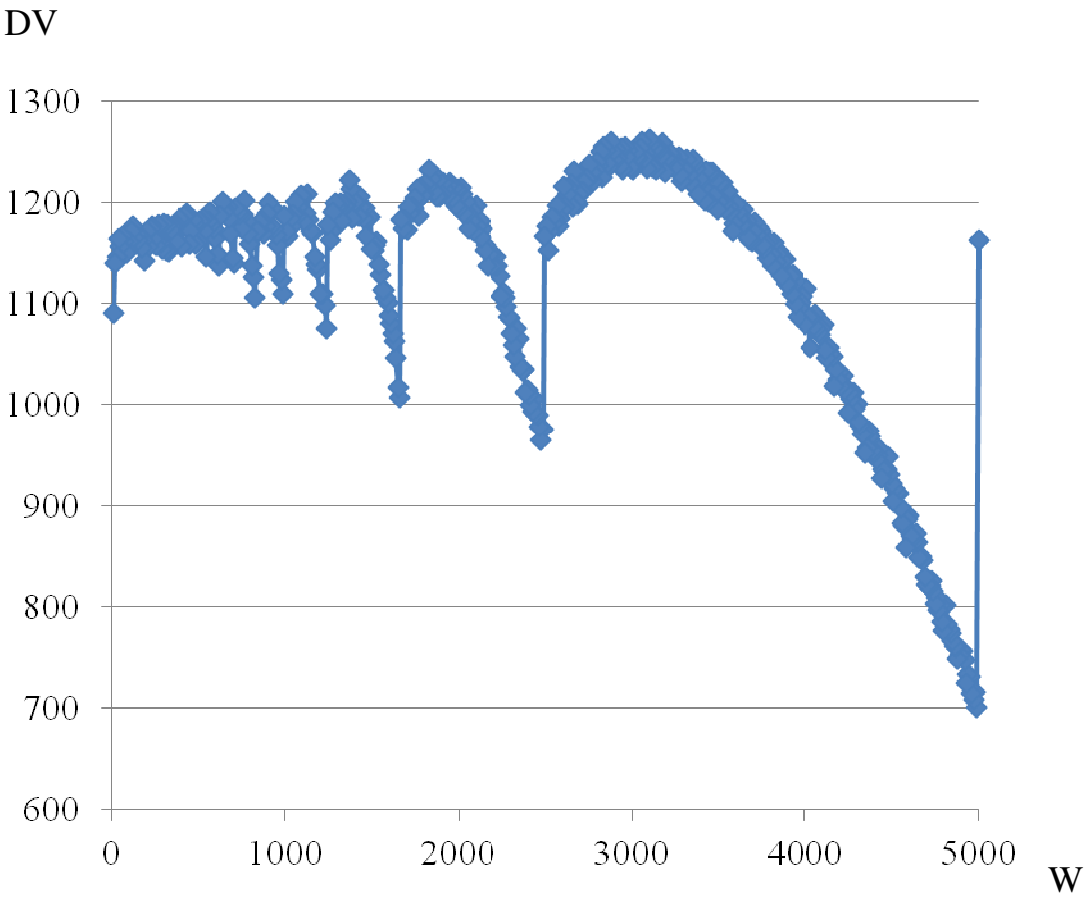


Рисунок К.21 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* від розміру горизонту прогнозування *W* при математичному сподіванню $E(V_{max})=0,75V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0,0004V_{max}$

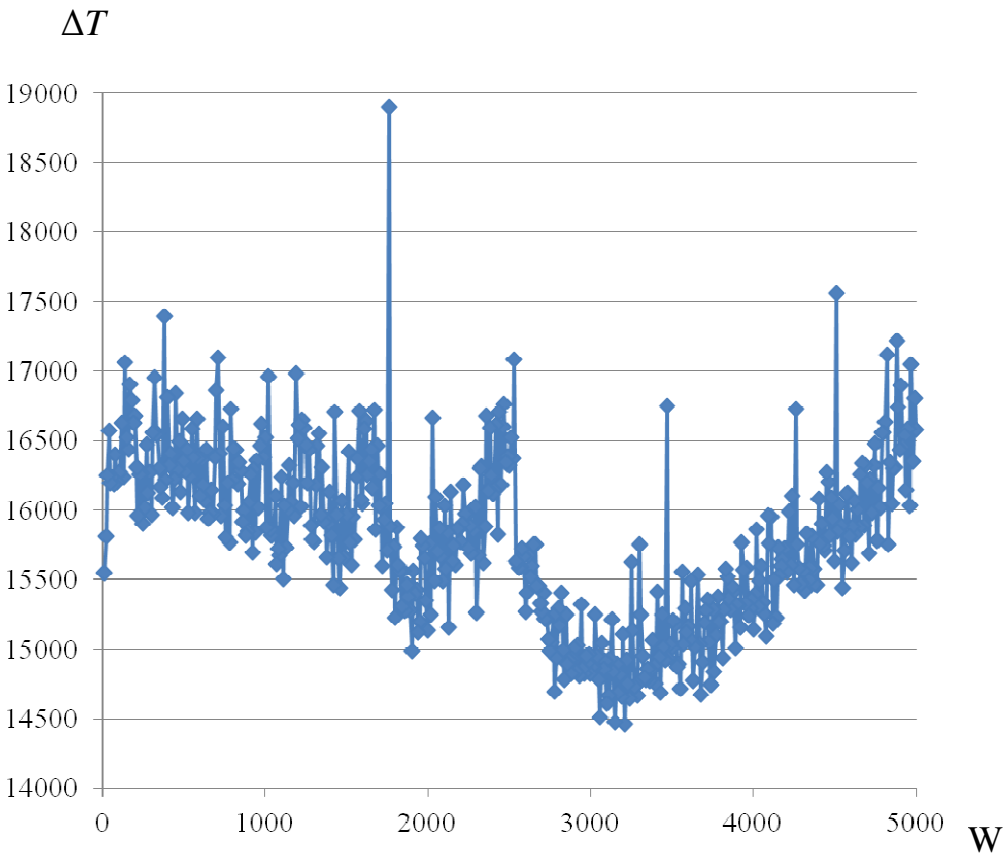


Рисунок К.22 – Залежність абсолютного сумарного відхилення від оптимальної програми *DV* відхилення від запланованого розкладу поїздки ΔT від розміру горизонту прогнозування *W* при математичному сподіванню $E(V_{max})=0{,}75V_{max}$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma(V_{max})=0{,}0004V_{max}$

Додаток Л Осцилограми, записані приладом Сканматік

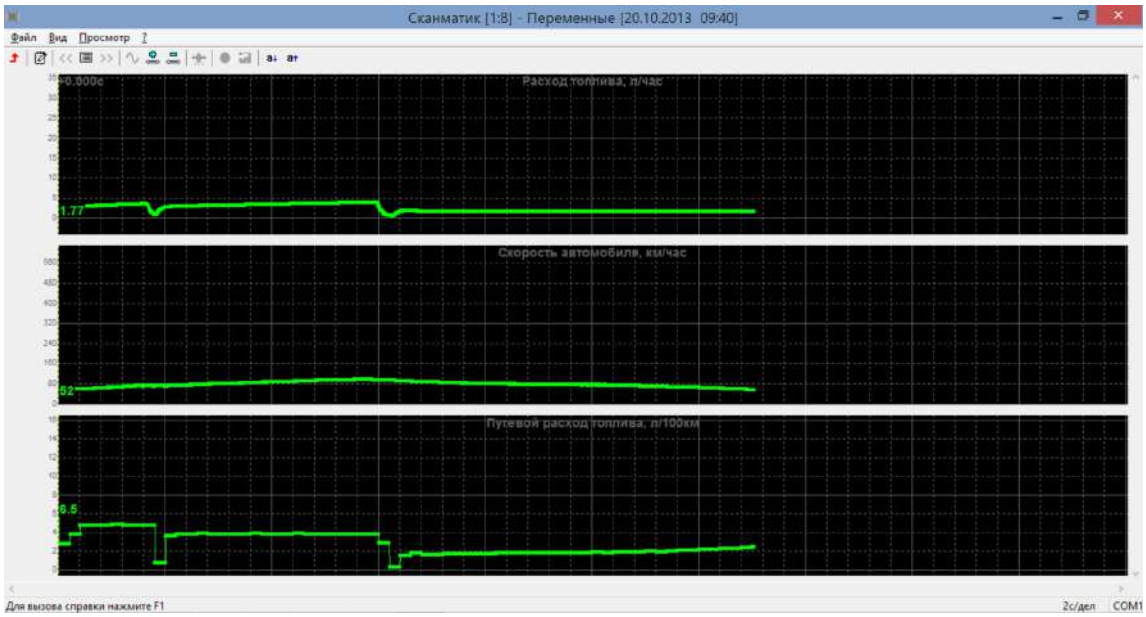


Рисунок Л.1 – Осцилограма магістрального циклу руху АТЗ: розгін від початкової швидкості 50 км/год. до 70, км/год. з мінімальним прискоренням

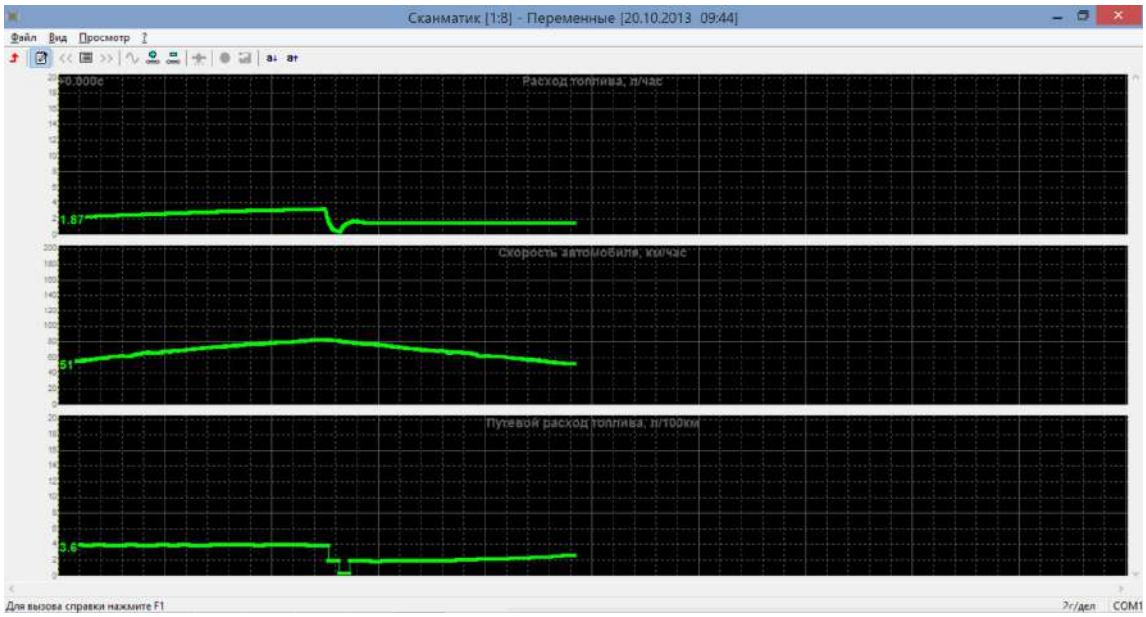


Рисунок Л.2 – Осцилограма магістрального циклу руху АТЗ: розгін від початкової швидкості 50 км/год. до 80 та 90 км/год. з мінімальним прискоренням

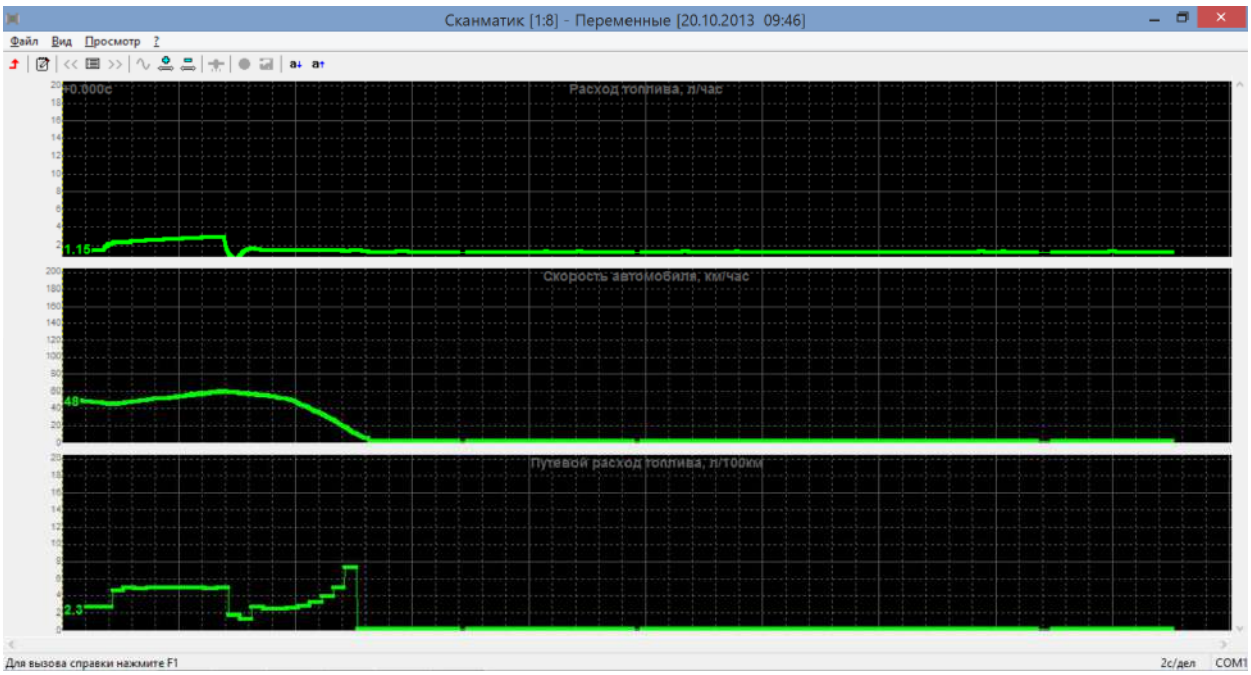


Рисунок Л.3 – Осцилограма магістрального циклу руху АТЗ: розгін від початкової швидкості 50 км/год. до 90 км/год. з мінімальним прискоренням

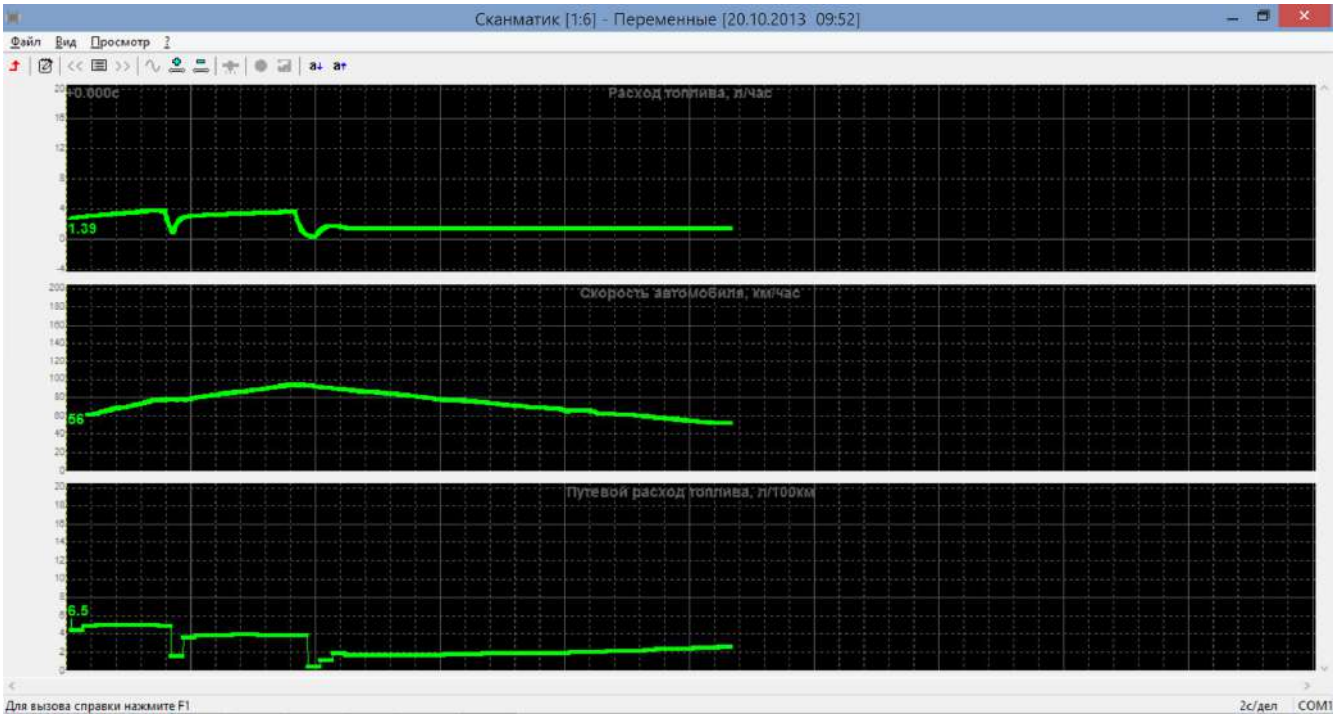


Рисунок Л.4 – Осцилограма магістрального циклу руху АТЗ: розгін від початкової швидкості 50 км/год. до 70 км/год. з максимальним прискоренням

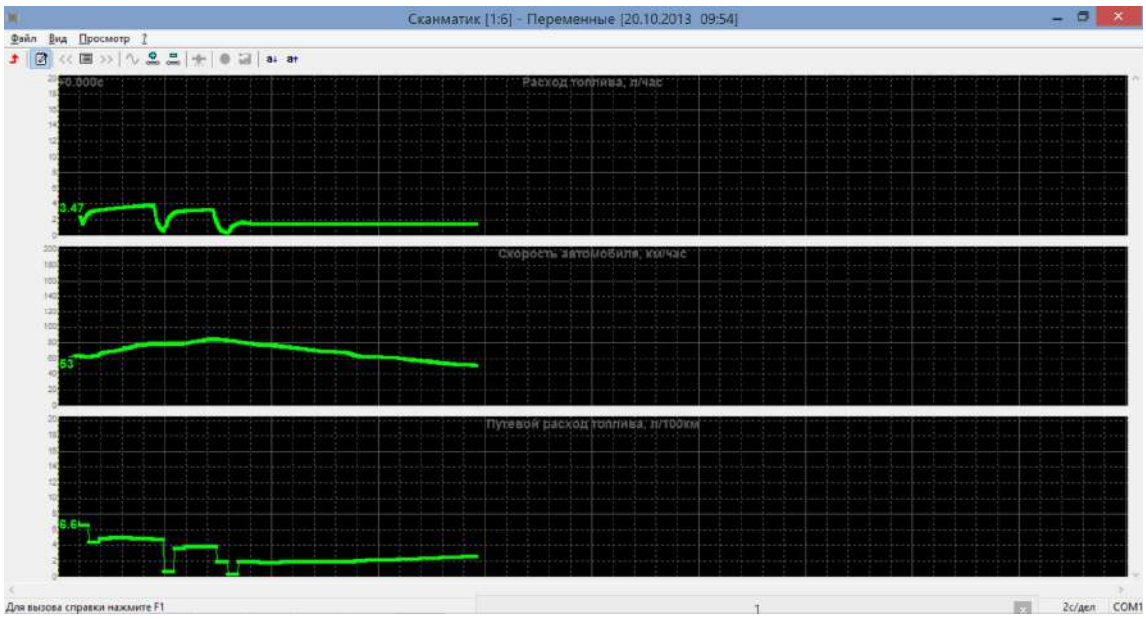


Рисунок Л.5 – Осцилограма магістрального циклу руху АТЗ: розгін від початкової швидкості 50 км/год. до 80 км/год. з максимальним прискоренням

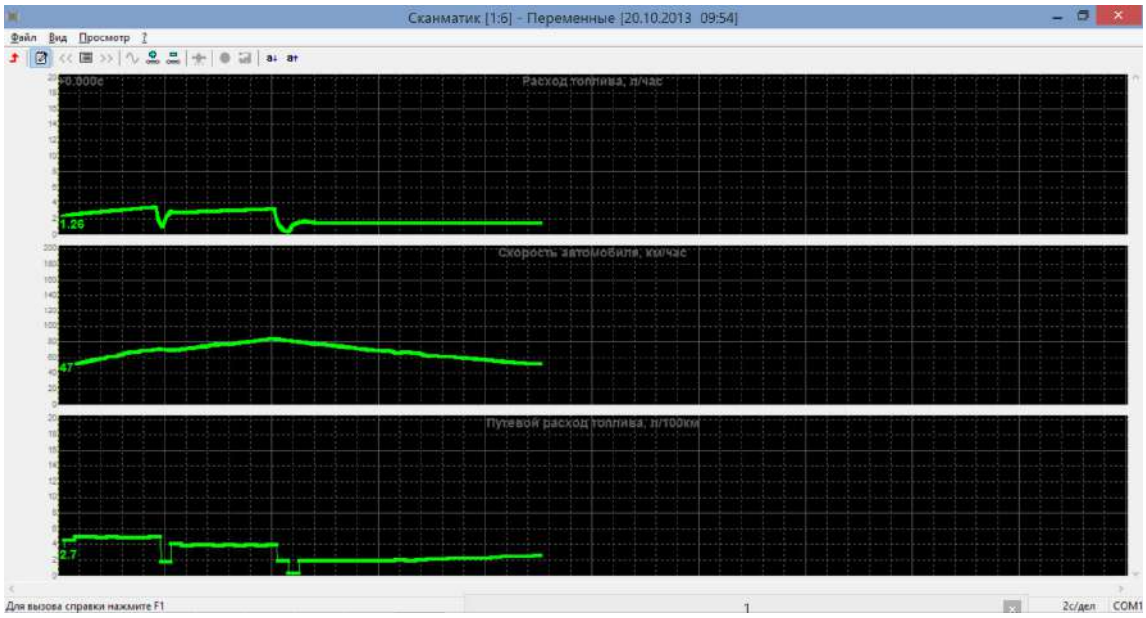


Рисунок Л.6 – Осцилограма магістрального циклу руху АТЗ: розгін від початкової швидкості 50 км/год. до 90 км/год. з максимальним прискоренням

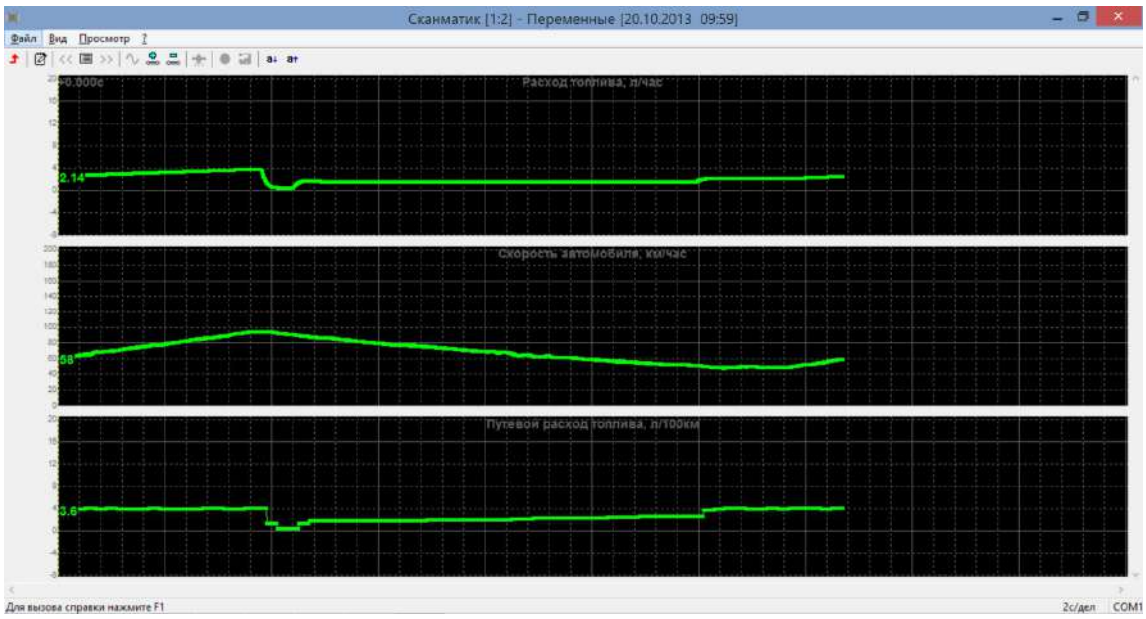


Рисунок Л.7 – Осцилограма магістрального циклу руху АТЗ: рівномірний рух з середньою швидкістю 75,7 км/год.

Додаток М Акти впровадження дисертаційних досліджень

«Затверджую»

Директор ТзОВ «Транспортна компанія Автотранс»

Жук З. В.

«25» листопада 2019

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, хто підписався нижче, засвідчуємо передачу і, відповідно, приймання для використання продукту наукової розробки, яка полягає в наступному.

Об'єкт впровадження.

"SCHEDULE-20" – комп'ютерна програма побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі.

Ким запропоновано.

Національний транспортний університет, кафедра міжнародних перевезень та митного контролю, автори: Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М.

Де і коли, з якою метою впроваджено.

Розроблене програмне забезпечення впроваджено на підприємстві ТзОВ «Транспортна компанія Автотранс»для оптимізації розкладу використання автопоїздів, роботи та відпочинку водіїв при виконанні міжміських великогуртових перевезеннях вантажів з листопада 2019 року при плануванні транспортних процесів.

Предмет, результати та ефективність впровадження.

Програма "Schedule-20" призначена для використання в галузі диспетчерського керування парком автомобільних транспортних засобів, які здійснюють вантажні магістральні перевезення. Вона дає можливість вказати

моменти відправлення і прибуття автомобілів з транспортних пунктів, враховуючи тривалість їх руху по магістралях, тривалість вимушеного простою, а також наявну інформацію про ймовірні замовлення на перевезення при наявності часових обмежень. Побудований програмою за використаним алгоритмом розклад роботи автопоїздів є найкоротшим за тривалістю для групи автомобілів. Розроблений під програмою алгоритм побудови спільного циклічного унітарного розкладу з часовими вікнами, дає розв'язок задачі побудови розкладів з достатньою точністю оцінки відхилення за прийнятний час для малих і великих масивів даних, які оперативно поновлюються.

В результаті використання комп'ютерної програми "Schedule-20" непродуктивні витрати часу автопоїздів на міжміських маршрутах скорочуються для сукупного парку автомобілів ТзОВ «Транспортна компанія Автотранс»

на 18-25% від загального часу транспортних циклів. Тривалість доставки вантажів на маршрутах, які обслуговує підприємство, скорочується на 12-20%.

На частку вигоди від впровадження комп'ютерної програми автори і власники програми не претендують.

Висновки, зауваження, пропозиції.

Впровадження і використання комп'ютерної програми дає змогу отримати бажані часові параметри унітарного циклічного розкладу парку транспортних засобів, розподіленого на магістральній мережі. На відміну від відомих програм, вона послідовно наближує до локальних оптимальних значень моментів початку виконання замовлень і забезпечує дотримання допустимих термінів виконання сукупного потоку замовлень.

Від підприємства:

керівник відділу транспорту _____ Пеух З.В.

Автори програми:

Прокудін Г. С. _____

Оліскевич М.С. _____

Шарай С.М. _____

«Затверджую»

Директор ТзОВ «Транспортна компанія Автотранс»

_____ Жук З.В.

«___» листопада 2019

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, хто підписався нижче, засвідчуємо передачу і, відповідно, приймання для використання продукту наукової розробки, яка полягає в наступному.

Об'єкт впровадження.

"SCHEDULE-20" – комп'ютерна програма побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі.

Ким запропоновано.

Національний транспортний університет, кафедра міжнародних перевезень та митного контролю, автори: Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М.

Де і коли, з якою метою впроваджено.

Розроблене програмне забезпечення впроваджено на підприємстві ТзОВ «Транспортна компанія Автотранс»для оптимізації розкладу використання автопоїздів, роботи та відпочинку водіїв при виконанні міжміських великогуртових перевезеннях вантажів з листопада 2019 року при плануванні транспортних процесів.

Предмет, результати та ефективність впровадження.

Програма "Schedule-20" призначена для використання в галузі диспетчерського керування парком автомобільних транспортних засобів, які здійснюють вантажні магістральні перевезення. Вона дає можливість вказати

моменти відправлення і прибуття автомобілів з транспортних пунктів, враховуючи тривалість їх руху по магістралях, тривалість вимушеного простою, а також наявну інформацію про ймовірні замовлення на перевезення при наявності часових обмежень. Побудований програмою за використаним алгоритмом розклад роботи автопоїздів є найкоротшим за тривалістю для групи автомобілів. Розроблений під програмою алгоритм побудови спільного циклічного унітарного розкладу з часовими вікнами, дає розв'язок задачі побудови розкладів з достатньою точністю оцінки відхилення за прийнятний час для малих і великих масивів даних, які оперативно поновлюються.

В результаті використання комп'ютерної програми "Schedule-20" непродуктивні витрати часу автопоїздів на міжміських маршрутах скорочуються для сукупного парку автомобілів ТзОВ «Транспортна компанія Автотранс»

на 18-25% від загального часу транспортних циклів. Тривалість доставки вантажів на маршрутах, які обслуговує підприємство, скорочується на 12-20%.

На частку вигоди від впровадження комп'ютерної програми автори і власники програми не претендують.

Висновки, зауваження, пропозиції.

Впровадження і використання комп'ютерної програми дає змогу отримати бажані часові параметри унітарного циклічного розкладу парку транспортних засобів, розподіленого на магістральній мережі. На відміну від відомих програм, вона послідовно наближує до локальних оптимальних значень моментів початку виконання замовлень і забезпечує дотримання допустимих термінів виконання сукупного потоку замовлень.

Від підприємства:
керівник відділу транспорту

Автори програми:

Прокудін Г. С.

Оліскевич М.С.

Шарай С.М.

«Затверджую»

Директор ТзОВ «Транспортна компанія Автотранс»

______________ Петр. З.В.

«21» листопада 2019

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, хто підписався нижче, засвідчуємо передачу і, відповідно, приймання для використання продукту наукової розробки, яка полягає в наступному.

Об'єкт впровадження.

Програма комп'ютерного імітаційного моделювання транспортного потоку на автостраді "Simulation 3".

Ким запропоновано.

Національний транспортний університет, кафедра міжнародних перевезень та митного контролю, автори: Оліскевич М.С., Шарай С.М.

Де і коли, з якою метою впроваджено.

Розроблена комп'ютерна програма впроваджена на підприємстві ТзОВ «Транспортна компанія Автотранс» для використання в галузі диспетчерського керування парком автомобільних транспортних засобів підприємства. Інсталяція програми виконана в жовтні 2019 року на одному робочому комп'ютері відділу транспорту. Мета використання – аналіз вхідного потоку замовлень і планування їх виконання.

Предмет, результати та ефективність впровадження.

Програма " Simulation 3" призначена для підприємств, які здійснюють вантажні магістральні перевезення. Вона визначає показники процесу обслуговування при застосуванні певної стратегії обслуговування вантажовласників парком транспортних засобів при виконанні міжміських великогуртових перевезеннях вантажів. Програма використовується із збереженими пакетними даними у вигляді зовнішнього txt-файла, який можна

незалежно редагувати перед використанням програми. Введені дані перевіряються програмою на коректність і видається, при наявності, інформація про фатальну помилку, через яку бажаний результат не може бути досягнуто. В режимі пакетного виконання програма використовує збережені дані із зовнішнього файла, також перевіряє можливість їх застосування і видає результат. Результати моделювання і обчислення параметрів потоку обслуговування записуються у зовнішній файл, для якого вказується його розташування на жорсткому диску.

В результаті використання комп'ютерної програми "Simulation 3" кількість відмов у виконанні замовлень скорочуються в цілому по підприємстві ТзОВ «Транспортна компанія Автотранс» до 35% від загального потоку заявок.

Тривалість виконання замовлень, скорочується на 12-20%.

На частку вигоди від впровадження комп'ютерної програми автори і власники програми не претендують.

Висновки, зауваження, пропозиції.

Впровадження і використання комп'ютерної програми дає змогу отримати бажану послідовність і графік виконання випадкових і регулярних замовлень на перевезення вантажів на магістральній мережі. Друга перевага представленої ІМ – це спрощена можливість відображати різні стратегії обслуговування замовлень на перевезення вантажів. Перевірка результатів роботи програми здійснювалась на трьох стратегіях, які є на практиці підприємства. Такі стратегії є логічними за умовами їх застосування. Однак, можливі й інші варіанти управління вантажопотоками, які можна відобразити як нескладну зміну запропонованого алгоритму. Комп'ютерна програма й алгоритм мають блочну структуру, яка дає змогу легко здійснити такі зміни. Це відкриває можливість застосувати методику для дослідження системи управлінських рішень ТзОВ, у тому числі – для дослідження умов взаємодії різних перевізників у кооперації.

Від підприємства:
керівник відділу транспорту _____ З.В.

Автори програми:
Олiскевич М.С. _____

Шарай С.М. _____

«Затверджую»
Директор ТОВ «Агро ЛВ Лімітед»
_____
«___»_____ 2019

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, нижче підписані, засвідчуємо передачу, приймання для використання у тестовому режимі продуктів наукових розробок, що полягають в наступному.

Об'єкт впровадження.

Програми комп'ютерного імітаційного моделювання транспортного потоку на автостраді "Simulation 3" (продукт 1) та комп'ютерна програма побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі "SCHEDULE-20" (продукт 2).

Ким запропоновано.

Національний транспортний університет, Кафедра міжнародних перевезень та митного контролю, продукт 1 – автори: Оліскевич М.С., Шарай С.М., продукт 2 автори: Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М.

Де і коли, з якою метою впроваджено.

Розроблені комп'ютерні програми впроваджено в тестовому режимі на підприємстві ТОВ Агро ЛВ Лімітед:

Продукт 1: для використання в галузі диспетчерського керування парком автомобільних транспортних засобів підприємства. Інсталяція програми виконана в жовтні 2019 року на робочому комп'ютері відділу транспорту. Мета використання – аналіз вхідного потоку замовлень і планування їх виконання.

Продукт 2: для оптимізації розкладу використання автопоїздів, роботи та відпочинку водіїв при виконанні міжміських перевезеннях вантажів в період осінньо-польових робіт 2019 року при плануванні транспортних процесів.

Предмет, результати та ефективність впровадження.

Програма "Simulation 3" (Продукт 1) призначена для підприємств, які здійснюють вантажні магістральні перевезення. Вона визначає показники процесу обслуговування при застосуванні певної стратегії обслуговування вантажовласників парком транспортних засобів при виконанні міжміських гуртових перевезеннях вантажів. Програма використовується із збереженими

пакетними даними у вигляді зовнішнього txt-файла, який можна незалежно редагувати перед використанням програми. Введені дані перевіряються програмою на коректність і видається, при наявності, інформація про фатальну помилку, через яку бажаний результат не може бути досягнуто. В режимі пакетного виконання програма використовує збережені дані із зовнішнього файла, також перевіряє можливість їх застосування і видає результат. Результати моделювання і обчислення параметрів потоку обслуговування записуються у зовнішній файл, для якого вказується його розташування на жорсткому диску.

В результаті використання комп'ютерної програми "Simulation 3" кількість відмов у виконанні замовлень скорочуються в цілому по підприємстві до 35% від загального потоку заявок. Тривалість виконання замовлень, скорочується на 12-20%.

На частку вигоди від впровадження комп'ютерної програми автори і власники програми не претендують.

Програма "Schedule-20" (Продукт 2) призначена для використання в галузі диспетчерського керування парком автомобільних транспортних засобів, які здійснюють вантажні магістральні перевезення. Вона дає можливість вказати моменти відправлення і прибуття автомобілів з транспортних пунктів, враховуючи тривалість їх руху по магістралях, тривалість вимушеного простою, а також наявну інформацію про ймовірні замовлення на перевезення при наявності часових обмежень. Побудований програмою за використаним алгоритмом розклад роботи автопоїздів є найкоротшим за тривалістю для групи автомобілів. Розроблений під програмою алгоритм побудови спільного циклічного унітарного розкладу з часовими вікнами, дає розв'язок задачі побудови розкладів з достатньою точністю оцінки відхилення за прийнятний час для малих і великих масивів даних, які оперативно поновлюються.

В результаті використання комп'ютерної програми "Schedule-20" непродуктивні витрати часу автопоїздів на міжміських маршрутах скорочуються для сукупного парку автомобілів на 18-25% від загального часу транспортних циклів. Тривалість доставки вантажів на маршрутах, які обслуговує підприємство, скорочується на 12-20%.

На частку вигоди від впровадження комп'ютерної програми автори і власники програми не претендують.

Висновки, зауваження, пропозиції.

Продукт 1: Впровадження і використання комп'ютерної програми дає змогу отримати бажану послідовність і графік виконання випадкових і регулярних замовлень на перевезення вантажів на магістральній мережі. Друга перевага – це спрощена можливість відображати різні стратегії обслуговування замовлень на перевезення вантажів. Перевірка результатів роботи програми здійснювалась на трьох стратегіях, які є на практиці підприємства. Такі стратегії є логічними за умовами їх застосування. Однак, можливі й інші варіанти управління вантажопотоками, які можна відобразити як нескладну зміну запропонованого алгоритму. Комп'ютерна програма й алгоритм мають блочну структуру, яка дає змогу легко здійснити такі зміни. Це відкриває можливість застосувати методику для дослідження системи управлінських рішень ТОВ, у тому числі – для дослідження умов взаємодії різних перевізників у кооперації.

Продукт 2: Впровадження і використання комп'ютерної програми дає змогу отримати бажані часові параметри унітарного циклічного розкладу парку транспортних засобів, розподіленого на магістральній мережі. На відміну від відомих програм, вона послідовно наближує до локальних оптимальних значень моментів початку виконання замовлень і забезпечує дотримання допустимих термінів виконання сукупного потоку замовлень.

За цим Актом жодних матеріальних, фінансових чи інших зобов'язань інтелектуальної власності чи обов'язків немайнового характеру та їх відшкодувань у будь якій формі не настає. Підписанти Акту не несуть жодних зобов'язань.

Акт складено у 2 примірниках, на 3 аркушах.

Від підприємства:
керівник відділу транспорту
Юрій Верещагов

Автори програм:
Прокудін Г. С. _____
Оліскевич М.С. _____
Шарай С.М. _____

«Затверджую»
Директор ТОВ «Агро ЛВ Лімітед»
_____ Ф.Бенко
«___» _____ 2019

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, нижче підписані, засвідчуємо передачу, приймання для використання у тестовому режимі продуктів наукових розробок, що полягають в наступному.

Об'єкт впровадження.

Програми комп'ютерного імітаційного моделювання транспортного потоку на автостраді "Simulation 3" (продукт 1) та комп'ютерна програма побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі "SCHEDULE-20" (продукт 2).

Ким запропоновано.

Національний транспортний університет, Кафедра міжнародних перевезень та митного контролю, продукт 1 – автори: Оліскевич М.С., Шарай С.М., продукт 2 автори: Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М.

Де і коли, з якою метою впроваджено.

Розроблені комп'ютерні програми впроваджено в тестовому режимі на підприємстві ТОВ Агро ЛВ Лімітед:

Продукт 1: для використання в галузі диспетчерського керування парком автомобільних транспортних засобів підприємства. Інсталяція програми виконана в жовтні 2019 року на робочому комп'ютері відділу транспорту. Мета використання – аналіз вхідного потоку замовлень і планування їх виконання.

Продукт 2: для оптимізації розкладу використання автопоїздів, роботи та відпочинку водіїв при виконанні міжміських перевезеннях вантажів в період осінньо-польових робіт 2019 року при плануванні транспортних процесів.

Предмет, результати та ефективність впровадження.

Програма "Simulation 3" (Продукт 1) призначена для підприємств, які здійснюють вантажні магістральні перевезення. Вона визначає показники процесу обслуговування при застосуванні певної стратегії обслуговування вантажовласників парком транспортних засобів при виконанні міжміських гуртових перевезеннях вантажів. Програма використовується із збереженими

пакетними даними у вигляді зовнішнього txt-файла, який можна незалежно редагувати перед використанням програми. Введені дані перевіряються програмою на коректність і видається, при наявності, інформація про фатальну помилку, через яку бажаний результат не може бути досягнуто. В режимі пакетного виконання програма використовує збережені дані із зовнішнього файла, також перевіряє можливість їх застосування і видає результат. Результати моделювання і обчислення параметрів потоку обслуговування записуються у зовнішній файл, для якого вказується його розташування на жорсткому диску.

В результаті використання комп'ютерної програми "Simulation 3" кількість відмов у виконанні замовлень скорочуються в цілому по підприємстві до 35% від загального потоку заявок. Тривалість виконання замовлень, скорочується на 12-20%.

На частку вигоди від впровадження комп'ютерної програми автори і власники програми не претендують.

Програма "Schedule-20" (Продукт 2) призначена для використання в галузі диспетчерського керування парком автомобільних транспортних засобів, які здійснюють вантажні магістральні перевезення. Вона дає можливість вказати моменти відправлення і прибуття автомобілів з транспортних пунктів, враховуючи тривалість їх руху по магістралях, тривалість вимушеного простою, а також наявну інформацію про ймовірні замовлення на перевезення при наявності часових обмежень. Побудований програмою за використаним алгоритмом розклад роботи автопоїздів є найкоротшим за тривалістю для групи автомобілів. Розроблений під програмою алгоритм побудови спільного циклічного унітарного розкладу з часовими вікнами, дає розв'язок задачі побудови розкладів з достатньою точністю оцінки відхилення за прийнятний час для малих і великих масивів даних, які оперативно поновлюються.

В результаті використання комп'ютерної програми "Schedule-20" непродуктивні витрати часу автопоїздів на міжміських маршрутах скорочуються для сукупного парку автомобілів на 18-25% від загального часу транспортних циклів. Тривалість доставки вантажів на маршрутах, які обслуговує підприємство, скорочується на 12-20%.

На частку вигоди від впровадження комп'ютерної програми автори і власники програми не претендують.

Висновки, зауваження, пропозиції.

Продукт 1: Впровадження і використання комп'ютерної програми дає змогу отримати бажану послідовність і графік виконання випадкових і регулярних замовлень на перевезення вантажів на магістральній мережі. Друга перевага – це спрощена можливість відображати різні стратегії обслуговування замовлень на перевезення вантажів. Перевірка результатів роботи програми здійснювалась на трьох стратегіях, які є на практиці підприємства. Такі стратегії є логічними за умовами їх застосування. Однак, можливі й інші варіанти управління вантажопотоками, які можна відобразити як нескладну зміну запропонованого алгоритму. Комп'ютерна програма й алгоритм мають блочну структуру, яка дає змогу легко здійснити такі зміни. Це відкриває можливість застосувати методику для дослідження системи управлінських рішень ТОВ, у тому числі – для дослідження умов взаємодії різних перевізників у кооперації.

Продукт 2: Впровадження і використання комп'ютерної програми дає змогу отримати бажані часові параметри унітарного циклічного розкладу парку транспортних засобів, розподіленого на магістральній мережі. На відміну від відомих програм, вона послідовно наближує до локальних оптимальних значень моментів початку виконання замовлень і забезпечує дотримання допустимих термінів виконання сукупного потоку замовлень.

За цим Актом жодних матеріальних, фінансових чи інших зобов'язань інтелектуальної власності чи обов'язків немайнового характеру та їх відшкодувань у будь якій формі не настає. Підписанти Акту не несуть жодних зобов'язань.

Акт складено у 2 примірниках, на 3 аркушах.

Від підприємства:
керівник відділу транспорту
Ю.Вер. Юрій Вернигоров

Автори програм:
Прокудін Г. С. _____
Оліскевич М.С. _____
Шарай С.М. _____

«Затверджую»

Директор ТОВ «Транс-Сервіс-1»

«30» 01 листопада 2019

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, хто підписався нижче, засвідчуємо передачу і, відповідно, приймання для використання продукту наукової розробки, яка полягає в наступному.

Об'єкт впровадження.

"SCHEDULE-20" – комп'ютерна програма побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі.

Ким запропоновано.

Національний транспортний університет, кафедра міжнародних перевезень та митного контролю, автори: Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М.

Де і коли, з якою метою впроваджено.

Розроблене програмне забезпечення впроваджено на підприємстві ТОВ «Транс-Сервіс-1» для оптимізації розкладу використання автопоїздів, роботи та відпочинку водіїв при виконанні міжміських великогуртових перевезеннях вантажів з листопада 2019 року при плануванні транспортних процесів.

Предмет, результати та ефективність впровадження.

Програма "Schedule-20" призначена для використання в галузі диспетчерського керування парком автомобільних транспортних засобів, які здійснюють вантажні магістральні перевезення. Вона дає можливість вказати моменти відправлення і прибуття автомобілів з транспортних пунктів, враховуючи тривалість їх руху по магістралях, тривалість вимушеного простою,

а також наявну інформацію про ймовірні замовлення на перевезення при наявності часових обмежень. Побудований програмою за використаним алгоритмом розклад роботи автопоїздів є найкоротшим за тривалістю для групи автомобілів. Розроблений під програмою алгоритм побудови спільного циклічного унітарного розкладу з часовими вікнами, дає розв'язок задачі побудови розкладів з достатньою точністю оцінки відхилення за прийнятний час для малих і великих масивів даних, які оперативно поновлюються.

В результаті використання комп'ютерної програми "Schedule-20" непродуктивні витрати часу автопоїздів на міжміських маршрутах скорочуються для сукупного парку автомобілів ТзОВ «Транс-Сервіс-1» на 20…25% від загального часу транспортних циклів. Тривалість доставки вантажів на маршрутах, які обслуговує підприємство, скорочується на 15…20%.

На частку вигоди від впровадження комп'ютерної програми автори і власники програми не претендують.

Висновки, зауваження, пропозиції.

Впровадження і використання комп'ютерної програми дає змогу отримати бажані часові параметри унітарного циклічного розкладу парку транспортних засобів, розподіленого на магістральній мережі. На відміну від відомих програм, вона послідовно наближує до локальних оптимальних значень моментів початку виконання замовлень і забезпечує дотримання допустимих термінів виконання сукупного потоку замовлень.

Від підприємства:
керівник відділу транспорту
_____

Автори програми:
Прокудін Г. С. _____
Оліскевич М.С. _____
Шарай С.М. _____

«Затверджую»

Директор ТзОВ «ЛВ-Транс»

Балух Андрій Андрійович

«6» листопада 2019

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, хто підписався нижче, засвідчуємо передачу і, відповідно, приймання для використання продукту наукової розробки, яка полягає в наступному.

Об'єкт впровадження.

"SCHEDULE-20" – комп'ютерна програма побудови оптимального за витратами часу розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі (міжміські і міжнародні великогуртові перевезення вантажів).

Ким запропоновано.

Національний транспортний університет, кафедра міжнародних перевезень та митного контролю, автори: Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М.

Де і коли, з якою метою впроваджено.

Розроблене програмне забезпечення впроваджено на підприємстві ТОВ «ЛВ-Транс» для оптимізації розкладу використання автопоїздів, роботи та відпочинку водіїв при виконанні міжміських великогуртових перевезень вантажів з листопада 2019 року при плануванні транспортних процесів.

Предмет, результати та ефективність впровадження.

Програма "Schedule-20" призначена для використання в галузі диспетчерського керування парком автомобільних транспортних засобів, які здійснюють вантажні магістральні перевезення. Вона дає можливість вказати

моменти відправлення і прибуття автомобілів з транспортних пунктів, враховуючи тривалість їх руху по магістралях, тривалість вимушеного простою, а також наявну інформацію про ймовірні замовлення на перевезення при наявності часових обмежень і ймовірних вимушених простоїв. Побудований програмою за використаним алгоритмом розклад роботи автопоїздів є найкоротшим за тривалістю для групи (парку) однотипних автомобілів. Розроблений під програмою алгоритм побудови спільного циклічного унітарного розкладу з часовими вікнами, дає точний гарантований розв'язок задачі побудови розкладів з оцінкою відхилення за прийнятний час для малих і великих масивів даних, які оперативно поновлюються з мережі інтернет, та внутрішньої бази даних.

В результаті використання комп'ютерної програми "Schedule-20" непродуктивні витрати часу автопоїздів на міжміських маршрутах скорочуються для сукупного парку автомобілів ТзОВ «ЛВ-Транс» на 20…25% від загального часу транспортних циклів. Тривалість доставки вантажів на відомих маршрутах, які обслуговує підприємство, скорочується на 15…20%.

На частку вигоди від впровадження комп'ютерної програми автори і власники програми не претендують.

Висновки, зауваження, пропозиції.

Впровадження і використання комп'ютерної програми дає змогу отримати бажані часові параметри унітарного циклічного розкладу парку транспортних засобів, розподіленого на магістральній мережі. На відміну від відомих програм, вона послідовно наближує до локальних оптимальних значень моментів початку виконання замовлень і забезпечує дотримання допустимих термінів виконання сукупного потоку замовлень. Програма може бути підключена як виконавчий модуль до диспетчерської системи і системи стеження за відправками.

Від підприємства:
керівник відділу логістики
Симусь І.О _____

Автори програми:
Прокудін Г. С. _____
Оліскевич М. С. _____
Шарай С. М. _____

«Затверджую»

Директор ТзОВ «ЛВ-Транс»
Балух Андрій Андрійович
_____
«6» листопада 2019

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, хто підписався нижче, засвідчуємо передачу і, відповідно, приймання для використання продукту наукової розробки, яка полягає в наступному.

Об'єкт впровадження.

"SCHEDULE-20" – комп'ютерна програма побудови оптимального за витратами часу розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі (міжміські і міжнародні великогуртові перевезення вантажів).

Ким запропоновано.

Національний транспортний університет, кафедра міжнародних перевезень та митного контролю, автори: Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М.

Де і коли, з якою метою впроваджено.

Розроблене програмне забезпечення впроваджено на підприємстві ТОВ «ЛВ-Транс» для оптимізації розкладу використання автопоїздів, роботи та відпочинку водіїв при виконанні міжміських великогуртових перевезень вантажів з листопада 2019 року при плануванні транспортних процесів.

Предмет, результати та ефективність впровадження.

Програма "Schedule-20" призначена для використання в галузі диспетчерського керування парком автомобільних транспортних засобів, які здійснюють вантажні магістральні перевезення. Вона дає можливість вказати

моменти відправлення і прибуття автомобілів з транспортних пунктів, враховуючи тривалість їх руху по магістралях, тривалість вимушеного простою, а також наявну інформацію про ймовірні замовлення на перевезення при наявності часових обмежень і ймовірних вимушених простоїв. Побудований програмою за використаним алгоритмом розклад роботи автопоїздів є найкоротшим за тривалістю для групи (парку) однотипних автомобілів. Розроблений під програмою алгоритм побудови спільного циклічного унітарного розкладу з часовими вікнами, дає точний гарантований розв'язок задачі побудови розкладів з оцінкою відхилення за прийнятний час для малих і великих масивів даних, які оперативно поновлюються з мережі інтернет, та внутрішньої бази даних.

В результаті використання комп'ютерної програми "Schedule-20" непродуктивні витрати часу автопоїздів на міжміських маршрутах скорочуються для сукупного парку автомобілів ТзОВ «ЛВ-Транс» на 20…25% від загального часу транспортних циклів. Тривалість доставки вантажів на відомих маршрутах, які обслуговує підприємство, скорочується на 15…20%.

На частку вигоди від впровадження комп'ютерної програми автори і власники програми не претендують.

Висновки, зауваження, пропозиції.

Впровадження і використання комп'ютерної програми дає змогу отримати бажані часові параметри унітарного циклічного розкладу парку транспортних засобів, розподіленого на магістральній мережі. На відміну від відомих програм, вона послідовно наближує до локальних оптимальних значень моментів початку виконання замовлень і забезпечує дотримання допустимих термінів виконання сукупного потоку замовлень. Програма може бути підключена як виконавчий модуль до диспетчерської системи і системи стеження за відправками.

Від підприємства:
керівник відділу логістики
Симусь І.О _____

Автори програми:
Прокудін Г. С. _____
Олескевич М. С. _____
Шарай С. М. _____

«Затверджую»

Директор ТОВ «Орлан Транс Груп»

«__8__» листопада 2019

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, хто підписався нижче, засвідчуємо передачу і, відповідно, приймання для використання продукту наукової розробки, яка полягає в наступному.

Об'єкт впровадження.

"SCHEDULE-20" – комп'ютерна програма побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі.

Ким запропоновано.

Національний транспортний університет, кафедра міжнародних перевезень та митного контролю, автори: Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М.

Де і коли, з якою метою впроваджено.

Розроблене програмне забезпечення впроваджено на підприємстві ТОВ «Орлан Транс Груп» для оптимізації розкладу використання автопоїздів, роботи та відпочинку водіїв при виконанні міжміських великогуртових перевезеннях вантажів з листопада 2019 року при плануванні транспортних процесів.

Предмет, результати та ефективність впровадження.

Програма "Schedule-20" призначена для використання в галузі диспетчерського керування парком автомобільних транспортних засобів, які здійснюють вантажні магістральні перевезення. Вона дає можливість вказати моменти відправлення і прибуття автомобілів з транспортних пунктів, враховуючи тривалість їх руху по магістралях, тривалість вимушеного простою,

а також наявну інформацію про ймовірні замовлення на перевезення при наявності часових обмежень. Побудований програмою за використаним алгоритмом розклад роботи автопоїздів є найкоротшим за тривалістю для групи автомобілів. Розроблений під програмою алгоритм побудови спільного циклічного унітарного розкладу з часовими вікнами, дає розв'язок задачі побудови розкладів з достатньою точністю оцінки відхилення за прийнятний час для малих і великих масивів даних, які оперативно поновлюються.

В результаті використання комп'ютерної програми "Schedule-20" непродуктивні витрати часу автопоїздів на міжміських маршрутах скорочуються для сукупного парку автомобілів ТзОВ «Орлан Транс Груп» на 20…25% від загального часу транспортних циклів. Тривалість доставки вантажів на маршрутах, які обслуговує підприємство, скорочується на 15…20%.

На частку вигоди від впровадження комп'ютерної програми автори і власники програми не претендують.

Висновки, зауваження, пропозиції.

Впровадження і використання комп'ютерної програми дає змогу отримати бажані часові параметри унітарного циклічного розкладу парку транспортних засобів, розподіленого на магістральній мережі. На відміну від відомих програм, вона послідовно наближує до локальних оптимальних значень моментів початку виконання замовлень і забезпечує дотримання допустимих термінів виконання сукупного потоку замовлень.

Від підприємства:

керівник відділу транспорту

_____

Автори програми:

Прокудін Г. С. _____

Оліскевич М.С. _____

Шарай С.М. _____

«Затверджую»

Директор ДП "Клас-Контакт" ТзОВ
"Міжнародна інформаційно-
консалтінгова група"

_____ Поліковський О.Г.

«___» листопада 2019

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, хто підписався нижче, засвідчуємо передачу і, відповідно, приймання для використання продукту наукової розробки, яка полягає в наступному.

Об'єкт впровадження.

"SCHEDULE-20" – комп'ютерна програма побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі.

Ким запропоновано.

Національний транспортний університет, кафедра міжнародних перевезень та митного контролю, автори: Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М.

Де і коли, з якою метою впроваджено.

Розроблене програмне забезпечення впроваджено на підприємстві ДП "Клас-Контакт" ТзОВ "Міжнародна інформаційно-консалтінгова група" для оптимізації розкладу використання автопоїздів, роботи та відпочинку водіїв при виконанні міжміських великогуртових перевезеннях вантажів з листопада 2019 року при плануванні транспортних процесів.

Предмет, результати та ефективність впровадження.

Програма "Schedule-20" призначена для використання в галузі диспетчерського керування парком автомобільних транспортних засобів, які здійснюють вантажні магістральні перевезення. Вона дає можливість вказати

моменти відправлення і прибуття автомобілів з транспортних пунктів, враховуючи тривалість їх руху по магістралях, тривалість вимушеного простою, а також наявну інформацію про ймовірні замовлення на перевезення при наявності часових обмежень. Побудований програмою за використаним алгоритмом розклад роботи автопоїздів є найкоротшим за тривалістю для групи автомобілів. Розроблений під програмою алгоритм побудови спільного циклічного унітарного розкладу з часовими вікнами, дає розв'язок задачі побудови розкладів з достатньою точністю оцінки відхилення за прийнятний час для малих і великих масивів даних, які оперативно поновлюються.

В результаті використання комп'ютерної програми "Schedule-20" непродуктивні витрати часу автопоїздів на міжміських маршрутах скорочуються для сукупного парку автомобілів ДП "Клас-Контакт" ТзОВ "Міжнародна інформаційно-консалтінгова група" на 18-25% від загального часу транспортних циклів. Тривалість доставки вантажів на маршрутах, які обслуговує підприємство, скорочується на 12-20%.

На частку вигоди від впровадження комп'ютерної програми автори і власники програми не претендують.

Висновки, зауваження, пропозиції.

Впровадження і використання комп'ютерної програми дає змогу отримати бажані часові параметри унітарного циклічного розкладу парку транспортних засобів, розподіленого на магістральній мережі. На відміну від відомих програм, вона послідовно наближує до локальних оптимальних значень моментів початку виконання замовлень і забезпечує дотримання допустимих термінів виконання сукупного потоку замовлень.

Від підприємства:

Інженер з транспортно-експедиторської діяльності

Шведа Ю.І. _____

Автори програми:

Прокудін Г. С. _____

Оліскевич М.С. _____

Шарай С.М. _____

«Затверджую»

Директор
ТОВ «Швидкий світ»
_____ Федунь С.І.
«__» листопада 2019

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, хто підписався нижче, засвідчуємо передачу і, відповідно, приймання для використання продукту наукової розробки, яка полягає в наступному.

Об'єкт впровадження.

"SCHEDULE-20" – комп'ютерна програма побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі.

Ким запропоновано.

Національний транспортний університет, кафедра міжнародних перевезень та митного контролю, автори: Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М.

Де і коли, з якою метою впроваджено.

Розроблене програмне забезпечення впроваджено на підприємстві ТзОВ «Швидкий світ» для оптимізації розкладу використання автопоїздів, роботи та відпочинку водіїв при виконанні міжміських великогуртових перевезеннях вантажів з листопада 2019 року при плануванні транспортних процесів.

Предмет, результати та ефективність впровадження.

Програма "Schedule-20" призначена для використання в галузі диспетчерського керування парком автомобільних транспортних засобів, які здійснюють вантажні магістральні перевезення. Вона дає можливість вказати моменти відправлення і прибуття автомобілів з транспортних пунктів, враховуючи тривалість їх руху по магістралях, тривалість вимушеного простою,

а також наявну інформацію про ймовірні замовлення на перевезення при наявності часових обмежень. Побудований програмою за використаним алгоритмом розклад роботи автопоїздів є найкоротшим за тривалістю для групи автомобілів. Розроблений під програмою алгоритм побудови спільного циклічного унітарного розкладу з часовими вікнами, дає розв'язок задачі побудови розкладів з достатньою точністю оцінки відхилення за прийнятний час для малих і великих масивів даних, які оперативно поновлюються.

В результаті використання комп'ютерної програми "Schedule-20" непродуктивні витрати часу автопоїздів на міжміських маршрутах скорочуються для сукупного парку автомобілів ТОВ «Швидкий світ» на 18-25% від загального часу транспортних циклів. Тривалість доставки вантажів на маршрутах, які обслуговує підприємство, скорочується на 12-20%.

На частку вигоди від впровадження комп'ютерної програми автори і власники програми не претендують.

Висновки, зауваження, пропозиції.

Впровадження і використання комп'ютерної програми дає змогу отримати бажані часові параметри унітарного циклічного розкладу парку транспортних засобів, розподіленого на магістральній мережі. На відміну від відомих програм, вона послідовно наближує до локальних оптимальних значень моментів початку виконання замовлень і забезпечує дотримання допустимих термінів виконання сукупного потоку замовлень.

Від підприємства:
керівник відділу транспорту
Світлик Т.Б.

Автори програми:
Прокудін Г. С. _____
Оліскевич М.С. _____
Шарай С.М. _____

«Затверджую»

Директор ТОВ «Молочна компанія
«Галичина»
_Сисун О.М._____
«12» листопада 2019

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, хто підписався нижче, засвідчуємо передачу і, відповідно, приймання для використання продукту наукової розробки, яка полягає в наступному.

Об'єкт впровадження.

"SCHEDULE-20" – комп'ютерна програма побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі.

Ким запропоновано.

Національний транспортний університет, кафедра міжнародних перевезень та митного контролю, автори: Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М.

Де і коли, з якою метою впроваджено.

Розроблене програмне забезпечення впроваджено на підприємстві ТОВ «Молочна компанія «Галичина»для оптимізації розкладу використання автопоїздів, роботи та відпочинку водіїв при виконанні міжміських великогуртових перевезеннях вантажів з листопада 2019 року при плануванні транспортних процесів.

Предмет, результати та ефективність впровадження.

Програма "Schedule-20" призначена для використання в галузі диспетчерського керування парком автомобільних транспортних засобів, які здійснюють вантажні магістральні перевезення. Вона дає можливість вказати моменти відправлення і прибуття автомобілів з транспортних пунктів, враховуючи тривалість їх руху по магістралях, тривалість вимушеного простою,

а також наявну інформацію про ймовірні замовлення на перевезення при наявності часових обмежень. Побудований програмою за використаним алгоритмом розклад роботи автопоїздів є найкоротшим за тривалістю для групи автомобілів. Розроблений під програмою алгоритм побудови спільного циклічного унітарного розкладу з часовими вікнами, дає розв'язок задачі побудови розкладів з достатньою точністю оцінки відхилення за прийнятний час для малих і великих масивів даних, які оперативно поновлюються.

В результаті використання комп'ютерної програми "Schedule-20" непродуктивні витрати часу автопоїздів на міжміських маршрутах скорочуються для сукупного парку автомобілів ТОВ «Молочна компанія «Галичина».

на 18-25% від загального часу транспортних циклів. Тривалість доставки вантажів на маршрутах, які обслуговує підприємство, скорочується на 12-20%.

На частку вигоди від впровадження комп'ютерної програми автори і власники програми не претендують.

Висновки, зауваження, пропозиції.

Впровадження і використання комп'ютерної програми дає змогу отримати бажані часові параметри унітарного циклічного розкладу парку транспортних засобів, розподіленого на магістральній мережі. На відміну від відомих програм, вона послідовно наближує до локальних оптимальних значень моментів початку виконання замовлень і забезпечує дотримання допустимих термінів виконання сукупного потоку замовлень.

Від підприємства:

керівник відділу транспорту

Товариство з обмеженою відповідальністю Молочна компанія «ГАЛИЧИНА» №8 Ідентифікаційний код 39685014 Україна м. Львів

Автори програми:

Прокудін Г. С.

Олійкевич М.С.

Шарай С.М.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

пр. Центральний, 59А, м. Сєвєродонецьк, Луганська обл., 93406
тел./факс: (06452) 4-03-42, http://www.snu.edu.ua/, e-mail: uni.snu.edu@gmail.com
код ЄДРПОУ 02070714

04.10.2017 № 1774/35 На № _____ від _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
_____ **О.В. Поркуян**
Ректор Східноукраїнського
національного університету
імені Володимира Даля

АКТ
про впровадження результатів науково-дослідної роботи
Олійкевича Мирослава Стефановича

Акт складено про те, що при написанні рекомендацій Всеукраїнської науково-практичної конференції «Логістичне управління та безпека руху на транспорті», що була проведена Східноукраїнським національним університетом імені Володимира Даля та Лиманським центром професійного розвитку персоналу «Донецька залізниця»» ПАТ «Укрзалізниця», 5-7 жовтня 2017 року, використані пропозиції **Олійкевича М.С.**

Наукові розробки **Олійкевича М.С.** «Розробка диспетчерської системи управління перевезенням вантажів на магістралях» зазначені у Звіті науково-практичної конференції «Логістичне управління та безпека руху на транспорті».

Представник організаційного
комітету конференції від
Східноукраїнського національного
університету імені Володимира Даля,
д.т.н., професор Н.Б. Чернецька-Білецька

Додаток Н Свідоцтва авторських прав на твір

УКРАЇНА

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 89420

Науковий твір "Алгоритм комп'ютерної програми побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі" ("Schedule-14")

(вид, назва твору)

Автор(и) Прокудін Георгій Семенович, Оліскевич Мирослав Стефанович, Чупайленко Олексій Андрійович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 05.06.2019

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508596

М.П.

Державний секретар Міністерства економічного розвитку і торгівлі України О. Ю. Перевезенцев

УКРАЇНА · UKRAINE · УКРАЇНА · UKRAINE · УКРАЇНА · UKRAINE · УКРАЇНА · UKRAINE · УКРАЇНА · UKRAINE · УКРАЇНА

УКРАЇНА

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 94207

Комп'ютерна програма "Scedule-20" - програма побудови оптимального розкладу вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі" ("Schedule-20")

(вид, назва твору)

Автор(и) **Прокудін Георгій Семенович, Оліскевич Мирослав Стефанович, Шарай Світлана Михайлівна**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 26.11.2019

М.П.

Заступник Міністра розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України Д. О. Романович

ПК «Україна». Зам. 39-2001. 2019 р. 1 кв.

УКРАЇНА

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 94208

Комп'ютерна програма "Imitation16" - програма, яка виконує імітацію міжміських автомобільних перевезень вантажів при випадковому вхідному потоку замовлень" ("Imitation16")

(вид, назва твору)

Автор(и) **Прокудін Георгій Семенович, Оліскевич Мирослав Стефанович, Шарай Світлана Михайлівна, Рой Максим Петрович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 26.11.2019

М.П.

Заступник Міністра розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України Д. О. Романович

ПК «Україна». Зам. 19-2001. 2019 р. I кв.

УКРАЇНА

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 94209

Комп'ютерна програма "Simulation 3" - програма імітаційного моделювання транспортного потоку на автостраді" ("Simulation 3")

(вид, назва твору)

Автор(и) **Оліскевич Мирослав Стефанович, Шарай Світлана Михайлівна**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 26.11.2019

М.П.

Заступник Міністра розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України Д. О. Романович

УКРАЇНА

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 94018

Науковий твір "Імітаційне моделювання взаємопов'язаних транспортних процесів на магістральній мережі"

(вид, назва твору)

Автор(и) **Шарай Світлана Михайлівна, Олескевич Мирослав Стефанович, Рой Максим Петрович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 19.11.2019

М.П.

Заступник Міністра розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України Д. О. Романович

УКРАЇНА • UKRAINE • УКРАЇНА • UKRAINE • УКРАЇНА • UKRAINE • УКРАЇНА • UKRAINE • УКРАЇНА • UKRAINE • УКРАЇНА

ПК «Україна». Зам. 19-2001. 2019 р. 1 кв.

Додаток П Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Оліскевич М. Передумови створення інтелектуальних систем оперативного керування автотранспортом при доставці вантажів у міжміському сполученні. *Бізнес-моделі розвитку транспортних, агропромислових і інших підприємницьких структур: сучасні реалії та перспективи:* Колективна монографія з міжнародною участю / за ред. Л. М. Савчук, Л. М. Бандоріної. Дніпро: Пороги, 2018. 416 с. (параграф 4.5, С. 200-209).
2. Oliskevytch M. Modelling of complex highway automated control system as tool for reducing fuel consumption and emission in heavy-duty trucks. *Energetic and ecological aspects of agricultural production*. Chapter 5. Warsaw Un. of Life Sciences. Warsaw, 2010. P. 48-58.

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

3. Stotsko Z., Oliskevych M. Vehicle driving cycle optimisation on the highway. *Transport Problems*: an International Scientific Journal, 2016. Vol. 11 (2), Issue 2. P. 123-133. (*Scopus*) DOI: 10.20858/tp.2016.11.2.12
4. Oliskevych M. Optimization of periodic unitary online schedule of transport tasks of highway road trains. *Transport Problems*, 2018. Vol. 13 Issue 1. P. 111-122. (*Scopus*) DOI: 10.21307/tp. 2018.13.1.10
5. Prokudin G., Oliskevych M., Chupaylenko O., Dudnik O. Development of vehicle speed forecasting method for intelligent highway transport system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 2019. № 4/3 (100). P.6–14. (*Scopus*) DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174255
6. Sharai S., Oliskevych M., Roi M. Development of the procedure for simulation modeling of interrelated transport processes on the main road network. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5/3 (101). 2019. P.70-83. (*Scopus*) DOI: 10.15587/1729-4061.2019.179042

7. Oliskevych M., Kovalyshyn S., Magats M., Shevchuk V., Sukach O. The optimization of trucks fleet schedule in view of their interaction and restrictions of the european agreement of work of crews. *Transport Problems,* 2020. Vol. 15 Issue 2. P. 157-170. (*Scopus*) DOI: 10.21307/tp-2020-028
8. Oliskevych M., Pelo R., Prokudina I., Silenko V., Sorokivskyi O., Zaiats O. Optimization of vehicle speed forecasting horizont on the intercity highway. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. 3/3 (105). P.57-68. (*Scopus*) DOI: 10.15587/1729-4061.2020.204273

Статті у фахових виданнях:

9. Вільковський Є.К., Оліскевич М. С., Дорош В. М. Методика визначення необхідної кількості автотранспортних засобів на маятникових маршрутах. *Вісник НТУ*, 2006. №13. Ч.2. С.68–72.
10. Оліскевич М. С. Вплив завантаженості автопотяга на питомі витрати палива. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. №6 (112). Луганськ, 2007. С. 169–173.
11. Доля В. К., Оліскевич М. С. Оптимізація параметрів інформаційних потоків при виборі режимів руху автотранспортних засобів на вантажних магістральних перевезеннях. *Коммунальное хозяйство городов*. Серія: технічні науки та архітектура. Харків. Техніка, 2007. Вип. 79. С. 305–313.
12. Оліскевич М. С. Класифікація логістичних операцій в транспортно-технологічних схемах. *Вісник НТУ*. ч. 2. КНТУ, 2007. Вип. 15. С. 144-148.
13. Оліскевич М. С. Імітаційне моделювання вибору програми руху автотранспортних засобів на магістральних перевезеннях. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка*. Харків, 2008. Вип. 75. том 2. С. 122-130.
14. Оліскевич М. С. Залежність швидкості і прискорення автомобіля в транспортному магістральному потоці від характеристик інформаційного поля. *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту*, 2008. №2(6). С.132–137.

15. Оліскевич М. С. Концепція архітектури інформаційної системи магістральної транспортної мережі. *Вісник ЖДТУ*. Технічні науки, 2008. №3 (46). Том 2. С. 98–106.

16. Форнальчик Є. Ю., Оліскевич М. С. Концепція автоматизованої системи керування магістральними автотранспортними потоками. *Вісник НТУ*. Київ, 2009. №18. С. 60–69.

17. Оліскевич М. С. Оптимізація інтервалів дискретизації навігаційної інформації при дотриманні найбільш ощадних програм руху автомобілів в логістичних системах. *Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів і поїздів*. Київ, 2009. №17. С. 304–310.

18. Оліскевич М. С. Механізм ситуаційного керування автомобілем в магістральному транспортному циклі. *Вісник Східноукраїнського Національного університету* ім. В. Даля. Луганськ, 2010. №6(148). с. 89–93.

19. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Умови ефективного застосування магістральних програм імпульсного руху вантажних автомобілів. *Проектування, виробництво, експлуатація автотранспортних засобів та автопоїздів*. Львів. НКЦ НТУ, 2010. №18. С. 172–178.

20. Оліскевич М. С. Дискретно-подійне моделювання магістральних транспортно-технологічних систем автомобільного транспорту. *Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля.* Луганськ, 2011. №5(159). С. 242–248.

21. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Оптимізація логістичних витрат у транспортно-технологічній системі доставки продуктів харчування. *Вісник Львівського Національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження.* Львів. нац. агроуніверситет, 2011. № 15. С. 32-39.

22. Оліскевич М. С. Алгоритм інформаційного забезпечення вільного руху автомобіля на магістралі за енергоощадною програмою. *Вісник СевНТУ,* 2012. Вип. 135. С. 142-145.

23. Оліскевич М. С., Дорош В. М. Імітаційне моделювання логістичних центрів в системі збуту продукції, яка швидко псується. *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля,* 2012. № 6 (177). Ч. 1. С. 98-103.

24. Оліскевич М. С. Оптимізація транспортних циклів залежно від обсягу прогнозованих вантажопотоків. *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля,* 2013. № 5 (194). Ч. 1. С. 140-145.

25. Оліскевич М. С. Обґрунтування періоду формування оптимальних планів перевезення вантажів на заданій транспортній мережі. *Вісник СевНТУ,* 2013. Вип. 142. С. 162-165.

26. Оліскевич М. С. Оптимізація структури автомобілепотоків для обслуговування заданого пункту відправлення вантажів. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2014. Вип № 45. С. 386-395.

27. Оліскевич М. С. Дослідження структури та параметрів транспортно-технологічної системи матеріального постачання за умов прогнозованої зміни попиту на продукцію. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, 2015. №1 (218). С. 226-229.

28. Оліскевич М. С. Стабілізація матеріальних потоків в транспортно-технологічних системах доставки вантажів. *Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля,* 2016. № 1 (225). С. 150-154.

29. Оліскевич М. С. Дослідження циклічних режимів роботи автомобіля на прямолінійній горизонтальній непересіченій ділянці дороги. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2016. Вип № 55. С. 261-268.

30. Оліскевич М. С. Методика оцінювання стабільності транспортно-технологічних схем за умов змінних матеріальних потоків. *Вісник Житомирського держ. технологічного ун-ту*, 2016. №2(77). С. 193-200.

31. Прокудін Г. С., Оліскевич М. С. Методика оптимізації спільного розкладу парку магістральних автомобілів при наявності часових обмежень. *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*, 2018. №2 (82). С. 118-126. DOI: https://doi.org/10.26642/tn-2018-2(82)-118-126

32.Прокудін Г. С., Оліскевич М. С. Вплив структури транспортної системи на показники якості доставки вантажів у міжміському сполученні. *Вісник Національного транспортного університету*. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник, 2019. Випуск 1 (43). С. 143-158. DOI: 10.33744/2308-6645-2019-1-43-143-158

33.Прокудін Г. Шарай С., Оліскевич М., Рой М. Моделювання взаємодії автомобільних транспортних підприємств на міжміських перевезеннях вантажів. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2019. 10 (2). С. 95-101. URL: 10.31649/2413-4503-2019-10-2-95-101.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

34.Оліскевич М. С., Дорош В. М. Дискретне моделювання матеріальних потоків в логістичних схемах доставки вантажів, які швидко псуються. *Вісник НТУ,* 2006. №200. С. 72–78.

35.Оліскевич М. С., Дорош В. М. Визначення необхідної кількості автотранспортних засобів в логістичній схемі збуту готової продукції. *Маркетинг та логістика в системі менеджменту*: тези доп. VI міжнар. наук.-практ. конф. (Львів. 9-10 лист. 2006) НУ „Львівська політехніка". Львів, 2006. С. 134.

36.Oliskevych M. Providing with optimal information amount the choice of hauling and speed modes of lorry on main transportations. *Problemy recyklingu*. Warszawa, 2007. P. 183-190.

37.Оліскевич М. С., Дорош В. М. Визначення необхідної кількості автотранспортних засобів у логістичній схемі збуту готової продукції. *Вісник Нац. ун-ту "Львів. політехніка". Логістика*, 2007. № 580. С. 307-313.

38.Оліскевич М. С., Дорош В. М. Залежність витрат енергії від динаміки виробничого процесу постачання замороженого м'яса. *Вісник Львівського Національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження*. Львів. нац. агроуніверситет, 2008. № 12. С. 64-75.

39. Oliskevycz M. Wpływ czynników organizacyjnych na toksyczność spalin emitowanych przez samochody ciężarowe w cyklu przewozowym w obrębie miasta. *Problemy recyklingu*. Warszawa, 2008. S. 83-87.

40. Оліскевич М., Козлинський М. Комплексна динамічна автоматизована система керування магістральними транспортними потоками. *Дев'ятий міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львов*і: тези доповідей. (Львів. 18-19 травня. 2009). Львів, 2009. С. 273-275.

41. Оліскевич М. С. Визначення параметрів розподілу бажаних швидкостей транспортних засобів у магістральному транспортному потоці: *65 наукова конференція науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету*: тези доп. (Київ. 14-18 травн. 2009) НТУ. Київ, 2009. С. 417-418.

42. Оліскевич М. С. Дослідження умов ефективності імпульсного руху магістральних автопоїздів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільної галузі*: тези доп. Всеукраїнська наук.-практ. конф. молодих учених та студентів. (Донецьк. 23-26 жовтн. 2011). Донецьк, 2011. С. 64.

43. Оліскевич М. С. Моделювання системи керування магістральними автомобілями як засобу рекуперації енергії за змінних дорожніх умов. *Десятий міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові*: тези доп. (Львів. 14-18 травн. 2011). Львів, 2011. С. 323-325.

44. Оліскевич М. С. Моделювання дискретних матеріалопотоків вантажних транспортних терміналів. *Проблеми підготовки професійних кадрів з логістики в умовах глобального конкурентного середовища*: матеріали 10-ї міжнар. наук.-практ. конф. (Київ. 18-19 жовтня 2012). Київ, 2012. С. 38-43.

45. Олискевич М. С., Дорош В. М. Оптимизация совместного расписания автомобилей и погрузчиков. *Современные фундаментальные и прикладные исследования*. УЦ «МАГИСТР». Кисловодск, 2013. №4(11) С. 55-60.

46. Оліскевич М. С. Устаткування для дослідження циклічних режимів роботи силових агрегатів автомобіля. *Одинадцятий міжнародний симпозіум*

українських інженерів механіків у Львові: тези доп. (Львів. 23-28 квітн. 2013). Львів, 2013. С. 121-122.

47. Оліскевич М. С. Дослідження умов ефективності імпульсного руху магістральних автопоїздів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільної галузі*: тези доп. ІІ Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених та студ. (Донецьк. 14-18 лист. 2013). Донецьк, 2013. С. 103-105.
48. Оліскевич М. С. Оптимізація транспортно-технологічних систем регіональної магістральної транспортної мережі. *Проблеми підготовки професійних кадрів з логістики в умовах глобального конкурентного середовища*: матеріали 11-ї міжнар. наук.-практ. конф. (Київ. НАУ, 25-26 жовтня 2013). Київ, 2013. С. 44-48.
49. Оліскевич М.С. Методика оптимізації транспортних циклів. *Проблеми розвитку транспортних систем і логістики*: тези доп. IV Міжнародної науково-практичної конференції. (Євпаторія. 14-16 травня 2013). Євпаторія, 2013. С.89-90.
50. Оліскевич М. С. Моделювання та оптимізація інформаційних потоків в логістичному ланцюзі постачання. *Міські регіональні транспортні проблеми:* тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. (Харків. 17-19 листоп. 2015). Харків, 2015. С. 55.
51. Оліскевич М. С. Теоретичне обґрунтування структури транспортного циклу магістрального автопоїзда. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: тези доп. VIII міжнар. наук.-практ. конф. (Вінниця. ВНТУ. 19-21 жовтня 2015). Вінниця, 2015. С. 169-171.
52. Оліскевич М. С. Обґрунтування оснащення експериментального автомобіля-тягача при побудові емпіричної моделі оптимального керування. *Дванадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові*: тези доп. (Львів. 22-26 квітн. 2015). Львів, 2015. С. 139.
53. Оліскевич М. С. Оптимізація розкладу роботи міських автобусів із застосуванням дискретно-подійного моделювання. *Автобусобудування та па-*

сажирські перевезення в Україні : матеріали Всеукр. наук.-практ. конференції. (Львів. 24-25 вересня 2015). Львів, 2015. С. 78-79.

54. Оліскевич М. С. Моделювання інформаційних потоків у транспортно-технологічній системі постачання вантажів. *Логістичне управління та безпека руху на транспорті* : тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф. студ. та молодих вчених. (Харків. 18-20 лист. 2015). Харків, 2015. С. 88-90.
55. Oliskevych M. Optimization of information flows of logistic supply chain. *Econtechmod*. An Internat. Quarterly Journal, 2015. Vol. 4, No. 4. P. 71-76.
56. Оліскевич М. С. Стабілізація матеріальних потоків в транспортно-технологічних системах доставки вантажів. *Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи*: тези доп. міжнар. наук-практ. конф. (Трускавець. 11-17 квітня 2016). Сєвєродонецьк, 2016. С. 133-134.
57. Оліскевич М. С. Алгоритм оптимізації циклів міжміських вантажних перевезень. *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка», Динаміка, міцність та проектування машин і приладів,* 2017. № 866. С. 206-210.
58. Оліскевич М. Оптимізація транспортних циклів міжміських вантажних перевезень. *Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання*: тези доповідей. наук.-практ. конф. Нац. ун-т «Львівська політехніка». (Львів. 16-18 березня 2017). Львів, С. 12-13.
59. Oliskevych M. Optimization of load scheme of heavy vehicle for a given flow of goods. *Econtechmod. An Internat. quarterly journal,* 2017. Vol. 06. N. 1. P. 55-62.
60. Oliskevych M. Dynamic scheduling of highway cargo transportation ICCPT 2019 Proceedings of 1st International Scientific Conference «*Current Problems of Transport 2019*» May, 2019. Ternopil, Ukraine. P. 141-151.
61. Lebid I., Shevchenko D., Kravchenya I., Luzhanska N., Prokudin G., Oliskevych M. Rationing of the number of signals and interlockings in the operational stock of railway stations. *MATEC Web of Conferences*, 03036 (2019) EOT-2019. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/2019???03036

Свідоцтва та патенти:

62. Свідоцтво серія № 94207 “SCHEDULE-20” – програма побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі. Прокудін Г.С., Оліскевич М.С., Шарай С.М. Дата реєстрації 26.11.2019.
63. Свідоцтво серія № 94208. Комп’ютерна програма “Imitation16” – програма, яка виконує імітацію міжміських автомобільних перевезень вантажів при випадковому вхідному потоку замовлень. Прокудін Г. С., Оліскевич М. С., Шарай С. М., Рой М. П. Дата реєстрації 26.11.2019.
64. Свідоцтво серія № 94209 Комп’ютерна програма “Simulation 3”– програма імітаційного моделювання транспортного потоку на автостраді. Оліскевич М. С., Шарай С. М. Дата реєстрації 26.11.2019.
65. Свідоцтво серія № 94018. Науковий твір «Імітаційне моделювання транспортних процесів на магістральній мережі» Шарай С. М., Оліскевич М. С., Рой М. П. Дата реєстрації 19.11. 2019.
66. Свідоцтво серія № 89420. Науковий твір «Алгоритм комп’ютерної програми побудови оптимального розкладу роботи вантажних автопоїздів на магістральній транспортній мережі» (“Schedule-14”). Прокудін Г. С., Оліскевич М.С., Чупайленко О. А. Дата реєстрації 05.06.2019.