УДК 656.13.073:658.21 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).362-374

О.С. Хачатурян, канд. екон. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: elenarice1210@gmail.com

Методологічні аспекти моделювання та оцінювання регіональних вантажопотоків у термінальних системах

У статті розглянуто актуальну науково-практичну проблему визначення потреб регіону в термінальних міжміських перевезеннях вантажів автомобільним транспортом. Сучасний стан галузі характеризується зростанням дрібних партій відправок та ускладненням логістичних ланцюгів, що робить традиційні методи організації перевезень малоефективними. Автор обґрунтовує, що впровадження термінальних систем є ключовим напрямом підвищення якості транспортно-експедиційного обслуговування та раціонального використання рухомого складу.

Основну увагу в роботі приділено методиці комплексного обстеження вантажопотоків, яка є передумовою для проєктування параметрів термінальної мережі. Пропонований підхід передбачає суцільне обстеження підприємств регіону незалежно від виду транспорту, яким вони користуються. У межах дослідження виокремлено етапи аналізу: від виявлення обсягів і періодичності вантажів до побудови матриць вантажопотоків і розрахунку необхідних ресурсів – складських площ, підйомно-транспортних механізмів та кількості автопоїздів.

Особливе місце в статті займає імітаційне моделювання процесу надходження відправок на термінал. Автор доводить, що через значні коливання частоти відправлень (від щоденних до щоквартальних) реальні розподіли вантажопотоків не відповідають класичним законам (нормальному, показовому чи Пуассона). Це підтверджує необхідність індивідуального моделювання для кожного конкретного об’єкта логістичної інфраструктури.

Також у роботі представлено топологічну модель регіону, де територія розглядається як сукупність правильних шестикутників (районів). Такий підхід дозволяє розрахувати середні відстані підвезення-розвезення вантажів та побудувати залежність обсягів перевезень від відстані навіть за умови відсутності повної статистичної інформації. Практична значущість дослідження полягає у можливості обґрунтувати економічну доцільність функціонування терміналів з точки зору мінімізації експлуатаційних витрат та забезпечення принципу доставки «точно в термін».

термінальні перевезення, **міжміські вантажопотоки**, **логістична інфраструктура**, **імітаційне моделювання**, **топологічна модель регіону** , **закон розподілу відправок** , **ефективність логістики**

Постановка проблеми. Сучасний стан міжміських автомобільних перевезень вантажів характеризується зростанням номенклатури та дрібності відправок, ускладненням логістичних зв’язків між підприємствами та підвищеними вимогами до якості транспортно-експедиційного обслуговування. За цих умов традиційна організація перевезень не забезпечує належної ефективності, своєчасності доставки та раціонального використання рухомого складу і складської інфраструктури. Особливо актуальною є проблема перевезення дрібних партій вантажів і кооперованих поставок промислових підприємств, які потребують пріоритетного та впорядкованого обслуговування.

Одним із перспективних напрямів розв’язання зазначених проблем є формування та розвиток системи термінальних перевезень у міжміському сполученні. Однак проєктування, впровадження та ефективне функціонування такої системи неможливе без ґрунтовного вивчення вантажопотоків регіону. Відсутність повної та систематизованої інформації про обсяги, структуру, напрямки та регулярність

© О. С. Хачатурян, 2026

міжміських вантажних перевезень, а також про потреби підприємств незалежно від виду транспорту, яким вони користуються, ускладнює обґрунтування параметрів термінальної мережі.

Таким чином, постає науково-практична проблема визначення реальних потреб регіону в термінальних міжміських перевезеннях за видами вантажів, а також обґрунтування необхідних ресурсів термінальної системи – складських площ, підйомно-транспортних механізмів і рухомого складу. Розв'язання цієї проблеми на основі комплексного обстеження вантажопотоків є необхідною передумовою підвищення ефективності організації міжміських автомобільних перевезень та вдосконалення транспортно-експедиційного обслуговування підприємств і організацій регіону.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Сучасні наукові дослідження в галузі організації вантажних перевезень та логістичних систем зосереджують увагу на розробці методичних підходів і моделей, що забезпечують більш точне вивчення вантажопотоків та визначення потреб у транспортно-логістичних інфраструктурах, зокрема термінальних системах. Це створює наукову основу для реалізації методів, запропонованих у досліджуваній роботі, які дозволяють визначити потреби регіону в термінальних перевезеннях вантажів, у розрізі видів вантажів та необхідних ресурсів для функціонування термінальної мережі.

Українські науковці останніми роками активно розглядають питання логістичної інфраструктури та ефективності функціонування транспортних систем. Зокрема, у роботах С.В. Цимбала і Р.В. Мельника [1] висвітлено логістику терміналів як перспективний напрям розвитку транспортно-логістичних систем України, що узагальнює теоретичні підходи до організації та оптимізації процесів перевалки і обробки вантажів на терміналах, включно з параметрами їх просторового розміщення і функціонування.

А.М. Пасічник [2] пропонує алгоритм побудови та оптимізації регіональної мережі транспортно-логістичних комплексів, що безпосередньо пов'язано з питаннями проектування термінальної системи та визначення її параметрів на регіональному рівні. Такий алгоритмічний підхід дозволяє враховувати характеристики вантажопотоків під час формування ефективної мережі транспортних вузлів.

Інші дослідження торкаються загальних аспектів логістичного менеджменту та інфраструктури транспорту. Так, М.В. Харченко [3] аналізує транспортно-логістичну інфраструктуру та її роль у соціально-економічних системах підприємств в Україні, що має важливе значення при оцінці потреб регіону в складських приміщеннях та технічних засобах термінальної системи.

У контексті методологічних підходів до організації перевезень варто також відзначити праці з оптимізації логістичних процесів, які розширюють розуміння функціональних зв'язків між логістичними витратами, часом доставки та ефективністю використання рухомого складу, що опосередковано впливає на організацію міжміських вантажопотоків. Стан цих підходів висвітлюється в працях Е.Е. Савицького [4] та інших дослідників, котрі вказують на важливість інтегрованого погляду на логістичні процеси при формуванні стратегій розвитку транспортних систем.

Таким чином, існуючі вітчизняні наукові джерела створюють широке теоретико-методичне підґрунтя для дослідження вантажопотоків і проектування термінальних систем. Ці публікації підтверджують актуальність розробки методів, що дозволяють комплексно оцінювати потреби регіону у міжміських термінальних перевезеннях, включаючи аналіз видів вантажів, більших обсягів і необхідного технічного та складського забезпечення.

Постановка завдання. Враховуючи актуальність розвитку термінальних систем у міжміському сполученні та складність прогнозування параметрів вантажопотоків у сучасних умовах, основним завданням даного дослідження є розробка та обґрунтування комплексного науково-методичного підходу до оцінювання потреб регіону у відповідній логістичній інфраструктурі.

Виклад основного матеріалу. Вивчення вантажопотоків у міжміських сполученнях проводиться для вдосконалення організації перевезень вантажів автомобільним транспортом загального користування, спрямованого на створення системи термінальних перевезень, що дозволяє значно покращити транспортно-експедиційне обслуговування підприємств та організацій, забезпечити перевезення дрібних партій вантажів та впорядкувати організацію міжміських перевезень, забезпечивши першочергове виконання кооперованих поставок промислових підприємств [5].

Мета вивчення вантажопотоків – визначити потреби обстежуваного регіону у термінальних перевезеннях вантажів у міжміському сполученні, у термінальних перевезеннях за видами вантажів, а також потреби термінальної системи у складських приміщеннях, підйомно-транспортних механізмах та рухомому складі, необхідних для виконання цих перевезень.

За результатами вивчення вантажопотоків виявляють усі дані, необхідні визначення основних параметрів термінальної системи регіону, щодо її проектування, впровадження та функціонування в оперативному регіоні.

При вивченні вантажопотоків регіону в міжміських внутрішньообласних перевезеннях проводиться суцільне обстеження всіх підприємств і організацій, що є в регіоні, незалежно від того, яким видом транспорту вони користуються задоволення своїх потреб у цих перевезеннях [6].

Терміни проведення обстеження та чисельність робочих груп визначаються виходячи з конкретних умов та затверджуються керівниками відповідних територіальних об'єднань автомобільного транспорту обстежуваного регіону.

Обстеження проводиться за методикою, в якій перші чотири таблиці складені таким чином, щоб відобразити кількісні та якісні характеристики з ввезення та вивезення вантажу на обстежуваному підприємстві, а саме:

– обсяги перевезень та кореспонденції щодо кожного найменування вантажу;
– структуру відправок за розміром;
– найменування, розмір і масу виробничої упаковки;
– необхідний тип рухомого складу;
– найменування пунктів кореспонденції вантажу та відстані перевезень;
– види транспорту, що використовуються.

На підставі наведених вище даних вибирають обсяги перевезень вантажів, які доцільно виконувати через термінали, у тому числі обсяги перевезень, які необхідно передати термінальній системі з інших видів транспорту, зокрема з залізниці, а також з відомчого автотранспорту. Складають матриці вантажопотоків, перевезень у регіоні через термінали. Узгоджують порядок виконання термінальних перевезень, складаючи часові графіки руху автопоїздів на постійних вантажопотоках. Розраховують потрібну кількість великовантажних автомобілів для міжтермінальних перевезень. Закріплюють клієнтуру за терміналами і для кожного з них визначають обсяг переробки вантажів.

Для кожного терміналу, виходячи з обсягів та структури переробки вантажів, визначають наявність та використання:

– складів у підприємств, закріплених за цим терміналом, та з урахуванням геометричних параметрів вантажів, періодичності їх надходження, необхідну для переробки даного обсягу вантажу площу складу терміналу, рівень механізації та необхідну кількість робітників;

– власного відомчого автотранспорту у закріплених за цим терміналом підприємств та потрібну кількість автомобілів для організації підвезення-розвезення вантажів на термінал;

– підйомно-транспортних механізмів у закріплених за цим терміналом підприємств та потреба у цих механізмах для забезпечення даного обсягу та структури перероблюваних вантажів на терміналі та для мобільного використання їх при організації вантажно-розвантажувальних робіт безпосередньо у клієнтури.

Методика аналізу містить такі етапи. На першому етапі проводиться виявлення обсягів і періодичності вантажів, що перевозяться, що приймаються до перевезення за термінальною технологією [7]. До перевезення за термінальною технологією приймають тарно-штучні вантажі, що допускають неодноразове навантаження.

На другому етапі аналізу проводиться заповнення форми [8]. Для цього використовують довідник тарифних відстаней та схему розміщення терміналів у регіоні. У кожну графу форми заносять дані щодо окремих кореспонденцій.

На третьому етапі визначають частотні розподіли відправок за масою вантажів, які ввозяться на термінали та вивозяться з них [7].

Істотне значення щодо термінальних систем перевезень вантажів має вигляд закону розподілу кількості відправок, що підвозяться щодня на термінал. Низка авторів [9-11], моделюючи роботу вантажної автостанції, користується для опису зазначеного розподілу нормальним або показовим законами. Однак нормальний закон розподілу справедливий за достатньо великої кількості відправників і досить частого надходження вантажів від них. Показовий закон досить точно описує розподіл відправок при малій кількості відправників та низькою частотою надходження вантажу від них. У низці випадків застосовується дискретний розподіл Пуассона.

Водночас у літературі відсутні досить точні визначення понять, а формулювання типу «досить велика» кількість відправників і «досить частого» надходження вантажів не дають можливості визначити кількісні межі застосування того чи іншого закону розподілу.

При аналізі та синтезі термінальних систем перевезень важливо знати вид та параметри відповідних законів розподілу сумарного вантажопотоку, що надходить на термінал залежно від добової потужності вантажопотоку від клієнтури та частоти відправлень вантажів від кожного відправника. Особливістю завдання є значне коливання можливого числа вантажів, що відправляються, і періодичності відправлень (від декількох відправлень на рік до щоденних). Ця обставина призводить до того, що у кожному конкретному випадку є різні параметри, а й різні закони розподілу шуканих випадкових величин. Для вивчення можливих варіантів аналізованої залежності необхідно виконати розрахунки ймовірностей. При цьому зробити такі припущення:

– розмір відправки, яка може бути доставлена на термінал, однакова для всіх відправників і дорівнює умовній одиниці;

– ймовірність підвезення відправки на термінал від відправників впродовж доби постійна і залежить лише від встановленої для даного відправника періодичності постачання *П*:

$$P=П/Д, \quad (1)$$

де *Д* – число робочих днів у році.

Моделювання можна провести за таким алгоритмом (рис. 1).

Крок 1. Встановлення числа відправників. Встановлюємо число відправників N.

Крок 2. Встановлення періодичності. Встановлюємо співвідношення груп клієнтів з тією чи іншою ймовірністю підвезення відправлення *P*:

$$\sum_{j=1}^{n} a_j = 1. \quad (2)$$

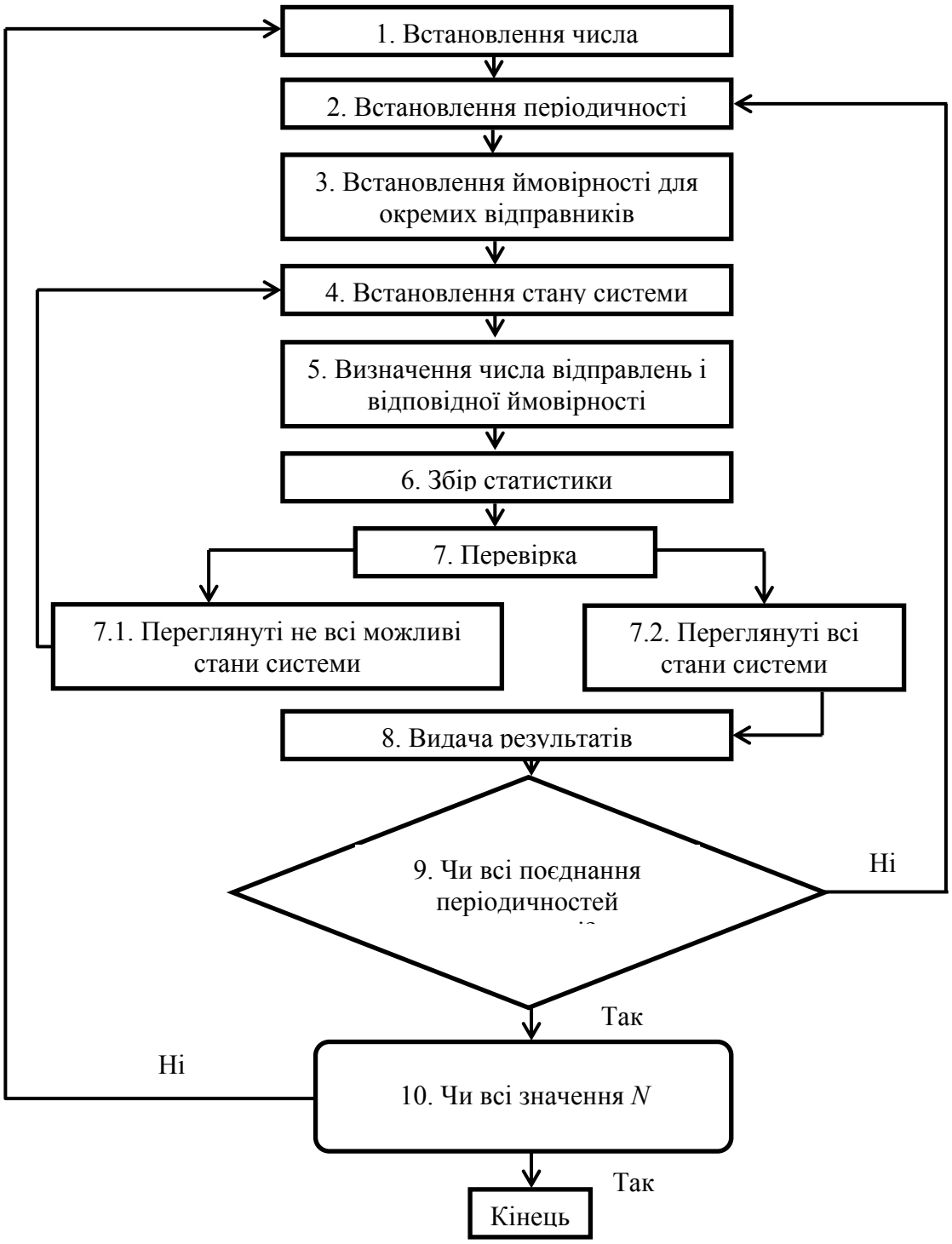


Рисунок 1 – Алгоритм моделювання системи перевезень вантажів в термінальних системах
Джерело: розроблено автором

При моделюванні значення a_j приймаємо кратним 0,2, а значення ймовірності P_j – таким, що відповідає щоденному, щотижневому, щоквартальному та щомісячному відправленню вантажів. Таким чином, на кроці 2 забезпечується повний перебір всіляких поєднань типу (табл. 1). Дані табл. 1 не є результатом статистичного

спостереження, а є інструментом для повного перебору можливих конфігурацій клієнтської бази термінала під час моделювання.

Таблиця 1 – Значення ймовірностей відправки вантажів за періодами

Щоденно	**Щотижня**	**Щомісячно**	**Щоквартально**
1,00	0,00	0,00	0,00
0,80	0,20	0,00	0,00
0,80	0,00	0,20	0,00
0,80	0,00	0,00	0,20
0,60	0,40	0,00	0,00
0,60	0,00	0,40	0,00
0,60	0,00	0,00	0,40
0,40	0,60	0,00	0,00
0,40	0,00	0,60	0,00
0,40	0,00	0,00	0,60
0,20	0,80	0,00	0,00
0,20	0,00	0,80	0,00
0,20	0,00	0,00	0,80
0,00	0,00	0,20	0,80

Джерело: розроблено автором

Крок 3. Встановлення ймовірності для окремих відправників. У залежності від встановленого на кроці 2 співвідношення a_j розраховуємо абсолютне число клієнтів з даною періодичністю відправлень: $n_j=N_{aj}$.

Після цього кожному клієнту присвоюємо відповідне значення ймовірності появи відправлення впродовж доби: $P_i=P_j$, якщо i-й клієнт входить у групу a_j.

Крок 4. Встановлення стану системи. На цьому кроці визначаємо стан кожного відправника (наявність або відсутність вантажу), котре визначає стан системи в цілому. Стан системи зображуємо двійковим кодом виду 01001, де кожна позиція відповідає одному з відправників, а цифра в даній позиції – наявності (1) чи відсутності (0) вантажу у даного відправника.

Крок 5. Визначення числа відправок і відповідної ймовірності. Для встановленого на кроці 4 стану системи визначаємо число відправок, які надійшли на термінал, і ймовірність даного стану:

$$P_{roo} = \prod_{i=1}^{N} f_i, \quad (3)$$

де N – загальна кількість відправників (клієнтів), закріплених за терміналом; $f_i=P_r$, якщо у i-го клієнта в цей день є відправка (стан «1» у двійковому коді); $f_i=1-P_{ri}$, якщо у i-го клієнта в цей день відправки немає (стан «0» у двійковому коді).

Формула 3 дозволяє перейти від індивідуальної поведінки окремих клієнтів до ймовірнісної картини роботи всього термінала.

На практиці це працює таким чином.

Уявімо спрощену систему з 3-х клієнтів (N=3) з різною періодичністю:

- Клієнт 1: возить щодня (P_1=1,0).
- Клієнт 2: возить щотижня (P_2≈0,2).
- Клієнт 3: возить щомісяця (P_3≈0,05).

Якщо необхідно знайти ймовірність стану 100 (коли приїхав лише перший клієнт), розрахунок буде таким:

$$P_{roo}=P_1(1-P_2)(1-P_3),$$
$$P_{roo}=1{,}0\cdot 0{,}8\cdot 0{,}95=0{,}76 \text{ (або 76\%)}.$$

Саме такий підхід обрано через те, що формула базується на припущенні, що поява вантажу у одного клієнта не залежить від іншого. Це дозволяє використовувати операцію множення ймовірностей. Оскільки алгоритм перебирає абсолютно всі комбінації нулів і одиниць (від 2^1 до 2^N станів), сума всіх отриманих P_{roo} завжди дорівнюватиме 1, що підтверджує математичну коректність моделі. Через множення малих і великих ймовірностей (P_i) підсумковий розподіл стає несиметричним і не вкладається в класичну криву Гауса.

Крок 6. Збір статистики. Після обчислення P_{roo} для кожного стану, програма не просто зберігає це число, а додає його до відповідної комірки масиву M, що відповідає сумарній кількості одиниць у двійковому коді. Так формується значення для кожної точки на рис. 2.

Крок 7. Перевірка закінчення. Якщо переглянуті не всі можливі стани системи, то повертаємося до кроку 4, де визначається черговий стан додаванням одиниці до поточного значення двійкового коду стану системи.

Крок 8. Видача результатів. На друк виводяться функція розподілу, полігон ймовірностей, математичне сподівання, середнє квадратичне відхилення та дисперсія розподілу, котрий моделюється, отримані в результаті обробки масиву M.

Крок 9. Чи всі поєднання періодичностей проглянуто? Якщо проглянуті не всі можливі поєднання періодичності відправлень, то повертаємося до кроку 2, де встановлюються нові значення a_j.

Крок 10. Чи всі значення N проглянуто? Якщо проглянуті не всі значення числа відправників N, то повертаємося до кроку 2, де встановлюється чергове значення N.

Крок 10 алгоритму є завершальним етапом моделювання, де відбувається синтез усіх попередніх розрахунків – від імітаційного моделювання потоків до уточнених транспортних відстаней. На цьому етапі система проводить ітераційну перевірку всіх можливих комбінацій параметрів для пошуку глобального оптимуму.

Покажемо детально, як уточнені відстані ($l_{п\text{-}р}$) з урахуванням специфіки Кіровоградського регіону трансформуються в економічні показники на Кроці 10, коли алгоритм порівнює витрати для різних конфігурацій термінальної мережі. Уточнене значення $l_{п\text{-}р}$ (з урахуванням $k_м$ та $k_{кор}$) безпосередньо змінює два ключові блоки розрахунків: транспортні витрати ($C_{тр}$) та часовий бюджет. Оскільки пробіг автомобілів тепер розрахований не теоретично, а з урахуванням реальної кривизни доріг та заторів, собівартість одного рейсу зростає. Крок 10 перевіряє, чи не перевищують ці витрати вигоду від консолідації вантажів. Довша відстань або складний рельєф збільшують час обороту автопоїзда. Якщо час виконання замовлення перевищує нормативний, алгоритм на Кроці 10 відкидає таку комбінацію як неефективну, навіть якщо вона дешева.

Економічна ефективність ($E_{заг}$) у нашій моделі визначається як мінімізація цільової функції сумарних витрат:

$$Z=C_{скл}+C_{тр}\rightarrow min.$$

Коли ми вводимо уточнені (збільшені за рахунок ландшафту та мережі) відстані, то змінюються «радіус вигідності» та оптимізується парк**.** Уточнена відстань може показати, що обслуговувати віддалених клієнтів (наприклад, у Гайворонському чи Світловодському районах) з центрального термінала в Кропивницькому дорожче, ніж прямими рейсами. Крок 10 допомагає точно визначити межу, де термінальна доставка стає збитковою. Через складні умови (високий $k_м$) продуктивність одного автопоїзда падає. Алгоритм перераховує кількість машин. Економічна ефективність на Кроці 10 покаже, що краще: купити більше малотоннажних авто чи один великий автопоїзд з довшим графіком збору.

Крок 10 завершується вибором тієї комбінації, де собівартість переробки 1 тони вантажу є мінімальною при дотриманні термінів доставки, а коефіцієнт використання вантажопідйомності рухомого складу є найвищим (уточнена відстань дозволяє точніше розрахувати вікна прибуття, щоб машини не їздили напівпорожніми через помилки в таймінгу).

Після перевірки всіх комбінацій ми отримуєте не просто «середні цифри», а ресурсну карту:

1. Скільки саме складських площ потрібно (враховуючи нерівномірність з рис. 2).

2. Яку реальну кількість палива та часу буде витрачено (враховуючи $k_м$ з формули 5).

3. Який тарифний план можна запропонувати клієнтам, щоб система була рентабельною.

Аналіз отриманого сімейства розподілів показує, що реалізована схема випробувань не призводить до отримання будь-якого класичного розподілу. Так, відсутність стабільного співвідношення між математичним сподіванням і дисперсією змушує відкинути біноміальний (для якого дисперсія у всіх випадках менше математичного сподівання), негативний біноміальний (дисперсія більше математичного сподівання) розподіли. Наявність моди не дозволяє застосувати для апроксимації отриманих даних показовий розподіл, несиметричний характер кривих – нормальний розподіл.

У зв’язку з цим при проведенні імітаційного експерименту розподіли апроксимувались усіченими нормальними кривими, підібраними за двома характерними точками модельних розподілів. Нормальний закон не відображує фізичного змісту результатів, проте використовується як зручне, з точки зору машинної реалізації, аналітичне наближення фактичних залежностей.

Для розрахунку показників ефективності впровадження термінальної системи в тому чи іншому регіоні необхідно визначити такі характеристики цього регіону:

1. Середню відстань перевезення 1 т вантажу для внутрішньо обласних перевезень визначаємо за звітними даними місцевого транспортного управління:

$$L=P/Q \tag{4}$$

де P – звітне значення вантажообігу у внутрішньо обласному сполученні в регіоні;
Q – звітне значення обсягу перевозок у внутрішньообласному сполученні в регіоні.

2. Середня відстань підвозу-розвозу вантажу в термінальній системі наближено визначаємо за формулою (4), а більш точно за залежністю:

$$l = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{S}{\pi \cdot K \cdot R}}, \tag{5}$$

де S – площа регіону; K – число терміналів у регіоні, визначене за критерієм мінімуму числа транспортних зв’язків; R – коефіцієнт розвитку дорожньої мережі, котрий визначає частку площі регіону, котра практично може обслуговуватися автомобільним транспортом. Значення R оцінюють експертно.

Таким чином, L являє собою половину радіуса умовного кола, площа котрого дорівнює площі обслуговування одного терміналу в регіоні, що розглядається.

Розрахунок за формулою (5) є критичним для Кроку 9 алгоритму. Знаючи середню відстань $l_{n\text{-}p}$, визначається час обороту автомобіля на маршруті «термінал–клієнт–термінал». Це дозволяє розрахувати змінну продуктивність рухомого складу. Зрештою, це дає змогу визначити, скільки одиниць транспорту потрібно для обслуговування того обсягу вантажу, який ми «отримали» в результаті імітаційного

моделювання (Крок 6). Отже, формула (5) перетворює географічні параметри регіону на техніко-економічні показники роботи системи.

Формула (5) описує середню відстань підвозу/розвозу вантажів ($l_{п\text{-}р}$) у межах зони обслуговування термінала, яка представлена як правильний шестикутник:

$$l_{п\text{-}р}=\frac{2}{3}R \cdot k_{\text{м}}, \quad (6)$$

де R – радіус описаного кола навколо шестикутної зони обслуговування (фактично – максимальна відстань від термінала до межі зони); 2/3 – теоретичний коефіцієнт, що випливає з інтегрування відстаней від центру до точок всередині правильної фігури (середнє плече доїзду); $k_м$ – коефіцієнт нелінійності (маневрування), який враховує, що автомобіль рухається не по прямій, а по реальній дорожній мережі зі звивинами та перехрестями.

Адаптація коефіцієнта нелінійності ($k_м$) для Кіровоградського регіону вимагає врахування як топології дорожньої мережі, так і специфічних експлуатаційних умов, що характерні для центру України. Оскільки регіон має виражену аграрно-промислову специфіку, $k_м$ у моделі перестає бути статичною константою і перетворюється на динамічний параметр.

Кіровоградська область характеризується радіальною структурою доріг, що сходяться до обласного центру (Кропивницького). При русі основними трасами (наприклад, М-30 або М-05) мережа досить прямолінійна, тому $k_м$ коливається в межах 1,15÷1,25. Для сільських та міжрайонних сполучень через необхідність об'їзду природних перешкод (балок, річок, як-то Інгул чи Синюха) та специфіку землевідведення агрохолдингів, коефіцієнт зростає до 1,35÷1,45. Тобто реальний шлях на 40% довший за пряму лінію.

Хоча Кропивницький не є мегаполісом, він має критичні вузли, що створюють ефект заторів (наприклад, залізничні переїзди або мости через Інгул). В імітаційній моделі затори адаптуються через $k_м$ не як збільшення відстані, а як збільшення часового еквівалента шляху. Якщо затор затримує авто на 20 хвилин, у формулу (5) закладається підвищувальний коефіцієнт (наприклад, +0,1 до базового $k_м$), що автоматично збільшує розрахункову потребу в кількості автопоїздів (Крок 9 алгоритму).

Кіровоградщина розташована на Придніпровській височині, що має розчленований рельєф. Велика кількість підйомів та спусків змушує водіїв вантажівок обирати пологіші, але довші шляхи. У моделі це враховується через диференціацію $k_м$ залежно від напрямку (наприклад, у західних районах області коефіцієнт традиційно вищий, ніж у південних степових). При плануванні маршрутів термінала часто доводиться обирати об'їзні шляхи з кращим покриттям, що також збільшує фактичний пробіг.

При реалізації алгоритму може бути впроваджений коефіцієнт коригування ($k_{кор}$), який буде множитись на базовий $k_м$ з формули (5):

$$l_{п\text{-}р}=\frac{2}{3}R \cdot (k_{\text{м}} \cdot k_{\text{кор}}). \quad (7)$$

Для умов «год пік» у місті $k_{кор}$=1,2; для нічних рейсів $k_{кор}$=1,0; для районів із складним рельєфом $k_{кор}$=1,15. Така адаптація дозволяє зробити модель чутливою до реального часу, що є критично важливим для термінальних систем, де графік прибуття дрібних партій вантажів має бути максимально точним.

Залежність обсягу перевозок вантажів від відстані (рис. 2) є необхідною для розрахунку низки показників ефективності термінальної системи. Однак статистичні дані, необхідні для побудови вказаної залежності, є далеко не по всіх регіонах України.

Нижче описується модель, яка може бути використана для наближеної оцінки картини вантажопотоків і побудови залежності Q-L для того чи іншого регіону.

Для моделювання обрано топологічну модель регіону, де територія розбивається на правильні шестикутники (соти). Це професійний підхід у транспортній логістиці через дві причини:

1. Відсутність порожнеч: на відміну від кіл, шестикутники повністю вкривають площину без накладень та прогалин.

2. Мінімальне відхилення: шестикутник найбільш наближений до кола за своєю формою, що робить розрахунок середньої відстані ($2/3 \cdot R$) максимально точним для радіальних систем.

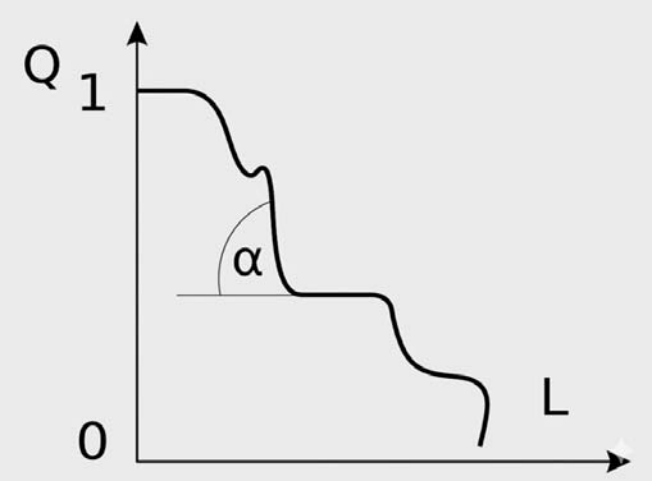


Рисунок 2 – Характерна залежність обсягу перевозок вантажів від відстані
Джерело: розроблено автором

В основу моделі покладені такі припущення:

а) передбачається, що найбільші обсяги перевозень у внутрішньообласному сполученні припадають на маршрути між районними центрами. На графіку *Q*-*L* (рис. 2) цим маршрутам відповідають нахилені «уступи», причому перший з них характеризує перевозки між сусідніми районами, другий – перевозки через один район и т. д.

б) передбачається, що крутизна кожного з таких «уступів» (кут α на рис. 2) залежить від частки міст серед населених пунктів даного регіону, причому крутизна тим більша, чим частка міст менша, і навпаки. Фізично це означає, що в розвинених регіонах з великою часткою міст припущення в пункті «а» виконується в меншій мірі, ніж в регіонах з незначною часткою міст.

в) топологічний регіон розглядається як частина площини, близька за формою до кола, заповнена правильними шестикутниками, що відповідають окремим районам. Число шестикутників дорівнює числу районів, а площа кожного з них:

$$S_6 = \frac{S \cdot K_{ДС}}{N}, \tag{8}$$

де S_6 – площа шестикутника; S – площа регіону; $K_{ДС}$ – коефіцієнт розвитку дорожньої мережі; N – число районів у регіоні.

г) районні центри вважаються розташованими в геометричних центрах шестикутників. Таким чином, відстань між сусідніми районними центрами дорівнює d, між центрами, розташованими «через район» – $2d$ і т. д. (рис. 3).

Відстань між сусідніми центрами:

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot S_6}{\sqrt{3}}} = 1{,}07\sqrt{S_6}. \tag{9}$$

д) частка перевозок h_i на відстань d, $2d$ і т. д. (тобто висота відповідного «уступу» на графіку Q-L (рис. 2) пропорційна числу маршрутів відповідної довжини на топологічній моделі регіону (рис. 3).

Таким чином, розглянуті методи визначають доцільність застосування участі термінального об'єкту в обслуговуванні вантажопотоку з точки зору доставки «точно в термін», економічної доцільності участі термінального об'єкту в каналі вантажопотоків з метою економії експлуатаційних витрат.

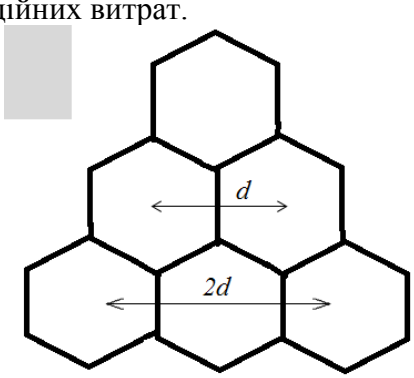


Рисунок 3 – Топологічна модель регіону

Джерело: розроблено автором

Висновки. 1. Обґрунтовано обмеженість традиційних підходів, які базуються на використанні класичних законів розподілу (Пуассона або нормального). Доведено, що при обслуговуванні дрібнопартіонних вантажопотоків із різною періодичністю відправлення (від щоденних до щоквартальних) реальний потік має дискретний та асиметричний характер, що не враховується стандартними методиками розрахунку складських площ.

2. Розроблено та реалізовано алгоритм імітаційного моделювання, який на основі двійкового кодування станів системи дозволяє розрахувати ймовірність кожної можливої комбінації надходження вантажів. Це забезпечує високу точність прогнозування пікових навантажень на термінал, що є критично важливим для уникнення черг та затримок у транспортно-експедиційному обслуговуванні.

3. Запропоновано вдосконалену модель топології регіону, де розрахунок середньої відстані підвозу-розвозу за формулою (5) адаптовано до специфіки дорожньої мережі. Впровадження коефіцієнта нелінійності $k_м$ дозволяє врахувати реальну конфігурацію транспортних шляхів та «заторні» фактори, що підвищує точність розрахунку необхідної кількості автопоїздів.

4. Доведено економічну ефективність ітераційного підходу (Крок 10 алгоритму), який через перевірку всіх комбінацій параметрів дозволяє знайти глобальний оптимум витрат. Це дає змогу мінімізувати сумарні витрати на утримання складу та експлуатацію транспорту, забезпечуючи при цьому гарантований рівень сервісу навіть для клієнтів із низькою періодичністю відправок.

5. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості створення «цифрового двійника» термінальної системи регіону. Це дозволяє логістичним операторам Кіровоградщини ще на етапі проектування гнучко змінювати параметри системи залежно від зміни клієнтської бази, не вдаючись до дорогих натурних експериментів.

Список літератури

1. Цимбал С.В. Мельник Р.В. Логістика терміналів (терміналістика) як один з перспективних напрямів розвитку логістики. *Вісник ВПІ.* 2024. Вип. 5 (176). С. 84-91. DOI: 10.31649/1997-9266-2024-176-5-84-91.

2. Пасічник А.М. Алгоритм побудови та оптимізації регіональної мережі транспортно-логістичних комплексів. *Математичне моделювання*. 2023. №2(49). С. 156-164. DOI: 10.31319/2519-8106.2(49)2023.293184.
3. Харченко М.В. Транспортно-логістична інфраструктура та її місце в соціально-економічній системі підприємств України. *Економічний простір.* 2020. №153. С. 83-88. DOI: 10.32782/2224-6282/153-15.
4. Савицький Е.Е. Вплив оптимізації логістичних процесів на ефективність комерційної діяльності підприємства. *Економіка та суспільство.* 2023. Вип. 52. С. 125-131. DOI: 10.32782/2524-0072/2023-52-47.
5. Голуб Д.В., Аулін В.В., Біліченко В.В., Замуренко А.С. Реалізація системного підходу при визначенні ефективності функціонування складних регіональних транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2022. Вип. 1(15), С. 44–51. URL: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-44-51.
6. Yang Zhang, Jinping Guan, Peiyu Jing, Linlin You, Fang Zhao, Moshe Ben-Akiva (2026). Future freight and logistics survey: An integrated vehicle-and-shipment-tracking data collection method and a case study in the United States. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* Vol. 205, January 2026, 104517.
7. Zając, M., Rozic, T., & Bajor, I. (2023). *Model for Evaluating the Effectiveness of Cargo Operation Strategy in an Inland Container Terminal*. Applied Sciences, 13(12), 7127. DOI: https://doi.org/10.3390/app13127127.
8. Freight Analysis Framework (FAF) U.S. Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics & Federal Highway Administration. *Freight Analysis Framework (FAF)*. https://ops.fhwa.dot.gov/freight/freight analysis/faf/?utm source=chatgpt.com.
9. Бондаренко С.М. Використання розподілу Пуассона в системі управління якістю на підприємстві . *Причорноморські економічні студії.* 2020. Вип. 58, Ч. 1. С. 108-112.
10. Колісник А.В. Формування автоматизованої технології транспортування контейнерів залізницею на основі теорії випадкових потоків. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.01 – «Транспортні системи» (275–Транспортні технології). – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2020.
11. Wang R., Li J., & Bai R. *Prediction and Analysis of Container Terminal Logistics Arrival Time Based on Simulation Interactive Modeling. Mathematics,* 11(15), 3271. DOI: https://doi.org/10.3390/math11153271.

References

1. Tsymbal, S.V., & Melnyk, R.V. (2024). Logistics of terminals (terminalistics) as one of the promising directions of logistics development. *Visnyk VPI,* 5(176), 84–91. 10.31649/1997-9266-2024-176-5-84-91. [in Ukrainian].
2. Pasichnyk, A.M. (2023). Algorithm for building and optimizing the regional network of transport and logistics complexes. *Mathematical Modeling,* 2(49), 156–164. 10.31319/2519-8106.2(49)2023.293184. [in Ukrainian].
3. Kharchenko, M.V. (2020). Transport and logistics infrastructure and its place in the socio-economic system of enterprises in Ukraine. *Economic Space,* 153, 83–88. doi.org/10.32782/2224-6282/153-15. [in Ukrainian].
4. Savytskyi, E.E. (2023). The impact of optimizing logistics processes on the efficiency of a company's commercial activities. Economy and Society, 52, 125–131. 10.32782/2524-0072/2023-52-47. [in Ukrainian].
5. Holub, D.V., Aulin, V.V., Bilichenko, V.V. & Zamurenko, A.S. (2022). Implementation of system approach in determining the efficiency of functioning of complex regional transport systems. *Journal of Mechanical Engineering and Transport,* 1(15), 44–51. https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-44-51 [in Ukrainian].
6. Yang Zhang, Jinping Guan, Peiyu Jing, Linlin You, Fang Zhao, Moshe Ben-Akiva (2026). Future freight and logistics survey: An integrated vehicle-and-shipment-tracking data collection method and a case study in the United States. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* Vol.205, January 2026, 104517 [English].
7. Zając, M., Rozic, T., & Bajor, I. (2023). *Model for Evaluating the Effectiveness of Cargo Operation Strategy in an Inland Container Terminal*. Applied Sciences, 13(12), 7127. DOI: https://doi.org/10.3390/app13127127 [English].

8. Freight Analysis Framework (FAF) U.S. Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics & Federal Highway Administration. *Freight Analysis Framework (FAF)*. https://ops.fhwa.dot.gov/freight/freight_analysis/faf/?utm_source=chatgpt.com [English].
9. Bondarenko, S.M. (2020). Using the Poisson distribution in the quality management system at the enterprise . *Black Sea Economic Studies.* Issue 58, Part 1. P. 108-112. [in Ukrainian].
10. Kolisnyk, A.V. (2020). Formation of automated technology for transporting containers by rail based on the theory of random flows. Qualification scientific work in the form of a manuscript. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.22.01 – «Transport Systems» (275– Transport Technologies). – Ukrainian State University of Railway Transport of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv [in Ukrainian].
11. Wang R., Li J., & Bai R. *Prediction and Analysis of Container Terminal Logistics Arrival Time Based on Simulation Interactive Modeling. Mathematics*, 11(15), 3271. DOI: https://doi.org/10.3390/math11153271 [English].

Olena Khachaturyan, PhD in econ. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Methodological Aspects of Modeling and Assessing Regional Cargo Flows in Terminal Systems

The scientific article analyzes and proposes a solution to a relevant scientific and practical problem — determining the objective needs of a specific region for the development of terminal intercity road freight transport systems. The author notes that the current stage of transport sector development is characterized by a steady trend toward increasing cargo nomenclature, fragmentation of shipment lots, and significant complexity of logistic links between business entities. Under such conditions, traditional approaches to organizing the transport process no longer ensure the necessary level of efficiency, leading to irrational use of rolling stock and overloading of warehouse infrastructure. The paper scientifically substantiates that the formation of a terminal network is a strategic direction for improving the quality of transport and forwarding services and optimizing the cooperative deliveries of industrial enterprises.

Fundamental attention in the study is paid to the development of the author's methodology for a comprehensive survey of freight flows, which serves as a mandatory prerequisite for the justified design of the future terminal network parameters. The proposed methodical approach is based on conducting a continuous survey of enterprises and organizations in the region, regardless of their departmental subordination or the current modes of transport they use. The author describes the stages of analysis in detail: from the primary identification of actual volumes, structure, and periodicity of freight flows to the construction of forecast correspondence matrices. Particular emphasis is placed on calculating the necessary material and technical resources of the system, including: optimal warehouse space, nomenclature of lifting and transport mechanisms, and the quantitative composition of the long-haul road train fleet.

The scientific novelty of the work is reinforced by the application of simulation modeling of the daily arrival of shipments at the terminal. Based on the calculations, the author proves that due to the extremely high amplitude of fluctuations in shipment frequency (from daily cycles to isolated quarterly requests), real distributions of freight flows deviate significantly from classical theoretical laws, such as normal, exponential, or Poisson distributions. This conclusion is of critical practical importance, as it confirms the impossibility of applying unified solutions and dictates the need for individual modeling for each separate logistics hub depending on the specifics of its client base.

Additionally, the paper presents an original topological model of the region, in which the studied territory is approximated as a collection of regular hexagons (districts). This geometric approach allows for high-precision calculation of average pickup and delivery distances within the terminal zone, as well as the construction of analytical dependencies of transport volumes on distance (Q-L graphs), even in situations where direct statistical information is incomplete or fragmented.

The practical significance of the results lies in creating an effective toolkit for management bodies and transport companies to justify the economic feasibility of terminal operations. The implementation of the proposed methods will contribute to a significant reduction in unit operating costs, ensuring the stable implementation of the "Just-in-Time" delivery principle and increasing the overall competitiveness of the region's transport system.

terminal transportation, **intercity freight flows**, **logistics infrastructure**, **simulation modeling**, **topological model of the region**, **distribution law of shipments**, **logistics efficiency**

Одержано (Received) 26.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 03.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 07.04.2026