

УДК 519.674:629.4

**Парубець О.М.**  
кандидат економічних наук, доцент,  
докторант кафедри економіки  
Національного авіаційного університету

## МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖЕВИХ СТРУКТУР НА ТРАНСПОРТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕОРІЇ ГРАФІВ

### MODELING TRANSPORT NETWORK STRUCTURE WITH ELEMENTS OF GRAPH THEORY

#### АНОТАЦІЯ

Вивчено застосування основних положень теорії графів для моделювання мережевої взаємодії підприємств транспорту. Встановлено, що теорія графів у дослідженні мережевих структурах на транспорті виявляє взаємозв'язки між їх учасниками, поведінка яких досліджується з врахуванням обмежень та можливостей, накладених мережами з метою подальшої оптимізації структури останніх.

**Ключові слова:** теорія графів, мережі, підприємства транспорту, моделювання, конкурентоспроможність.

#### АННОТАЦИЯ

Изучено применение основных положений теории графов для моделирования сетевого взаимодействия предприятий транспорта. Установлено, что теория графов в исследовании сетевых структур на транспорте обнаруживает взаимосвязи между их участниками, поведение которых исследуется с учетом ограничений и возможностей, наложенных сетями с целью дальнейшей оптимизации структуры последних.

**Ключевые слова:** Теория графов, сети, предприятия транспорта, моделирование, конкурентоспособность.

#### ANNOTATION

This article is devoted to the application of the basic tenets of the graphs theory for modeling networking transport enterprises. Graph theory in the study of network structures in transport reveals the relationship between the parties whose behavior is investigated taking into account the constraints and opportunities imposed by the network in order to further optimize of them structure.

**Keywords:** graph theory, network, transport companies, modeling, competitiveness.

**Постановка проблеми.** Транспорт, будучи одним з головних національних ресурсів, виконує суттєву роль у розвитку виробничого та економічного потенціалу країни. Саме розуміння системоутворюючої ролі транспорту і його впливу на розвиток бізнесу, зовнішньоекономічної діяльності є запорукою економічного зростання держави і окремих адміністративно-територіальних одиниць. Розвиток інформаційно-комунікаційних технологій та посилення конкуренції на ринку транспортно-логістичних послуг спонукає підприємства транспорту до пошуку нових інноваційних форм ведення бізнесу, заснованих на використанні основних положень теорії складних мереж.

Практичне застосування цієї теорії для вирішення проблем мережевої взаємодії підприємств транспорту між собою та іншими економічними агентами неможливе без розгляду інструментарію теорії графів, яка є розділом дискретної математики, має міждисциплінарний характер та широко використовується в різних сферах наукової діяльності.

На транспорті ця теорія зазвичай використовується для пошуку оптимальних маршрутів перевезення пасажирів та доставки вантажів, планування мережі доріг. Виникнення теорії графів опосередковано пов'язано з розвитком транспорту, а саме пошуком оптимального маршруту. Відомий математик Леонард Ейлер в 1736 році сформулював та запропонував розв'язання задачі про існування маршруту обходу семи мостів у м. Кенігсберзі, яка потім стала класичною задачею теорії графів. Саме Л. Ейлеру належить ідея використовувати графічні зображення для пошуку оптимальних рішень різноманітних задач, особливо під час дослідження взаємовідносин різноманітних об'єктів.

Розвиток мережевих взаємовідносин підприємств транспорту є запорукою підвищення конкурентоспроможності та вирішення значної кількості системних проблем в їх діяльності. З огляду на це формування мережевих новоутворень на транспорті потребує відповідного теоретико-методологічного обґрунтування застосування основних положень теорії графів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Особливості використання теорії графів для оптимізації процесів вантажо- і пасажироперевезень в розрізі різних видів транспорту досліджені в наукових працях О.В. Гаснікова, І.О. Євіна, С.Л. Кленова, Д.О. Ломаша, В.Я. Негрея, Є.О. Нурминського, В.О. Подкопаєва, М.В. Правдіна, Є.М. Ульяницького, О.І. Філопенкова, Я.О. Холодова, Н.Б. Шамрай та ін.

Не дивлячись на значну кількість проведених досліджень, залишаються не вирішеними питання використання елементів теорії графів для моделювання діяльності транспортних підприємств, що належать до складу мережевих структур.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Як вже зазначалося, теорія графів є потужним інструментом дослідження мережевих взаємовідносин на рівні підприємств різних видів транспорту.

Перші спроби графічної оптимізації транспортного обслуговування проводились в напрямках пошуку кращих маршрутів перевезення вантажів та пасажирів, взаємодія транспортних підприємств зазвичай розглядалась як співп-

раця відправника, посередника та отримувача вантажу, а алгоритми оптимізації передбачали багатоітераційні ручні розрахунки.

**Метою статті** є дослідження можливості застосування елементів теорії графів для моделювання процесів мережевої взаємодії підприємств транспорту.

**Виклад основного матеріалу.** Основи математичного обґрунтування використання теорії графів в економіці були закладені Дж. Авондо-Бодіно ще на початку 60-х років минулого століття [1]. Автором запропоновано топологічний підхід для вирішення низки виробничих завдань, зокрема і метод вирішення відомого транспортного завдання. Для транспортної галузі наводились абстрактні математичні алгоритми вирішення завдань оптимізації транспортної мережі, транспортного потоку.

Більш практичний погляд на моделювання транспортних потоків на залізниці реалізували Є.М. Ульяницький, О.І. Філоненков, Д.О. Ломаш [2], які використовували для дослідження неорієнтований граф  $G(S, E)$ , де вузлами (акторами) була неупорядкована множина транспортних вузлів, серед яких виділені початкові, транзитні та кінцеві вузли вантажопотоку  $S\{S_1, S_2, S_3, \dots, S_n\}$ . Кожній дузі графа  $E$  відповідає певна швидкість проходження та довжина ділянки між вузлами. Для кожного вузла задаються надходження вагонів до вузла, час обробки вантажу, простоювання вагонів на транзитних станціях з переробкою вантажу та без неї (рис. 1).

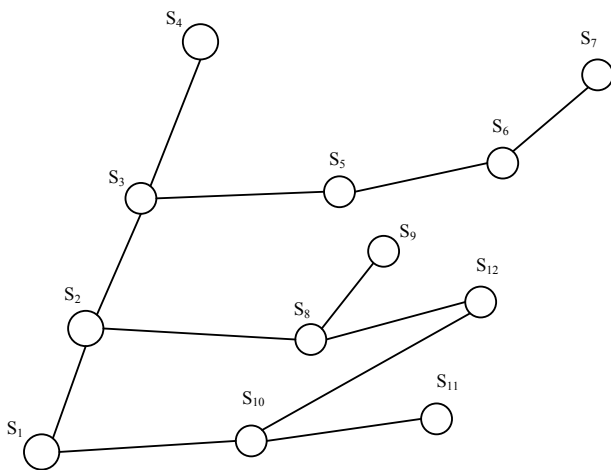


Рис. 1. Приклад полігону для розрахунку вантажообігу на залізниці

Для оптимізації автори рекомендують використовувати такі системи імітаційного моделювання, як GPSS World Student Version for Windows, Extend, Arena, Sym Process.

Колектив зазначених авторів на прикладі моделювання взаємодії залізниці з морськими портами також розглядали неорієнтований граф  $G(N, E)$ , де,  $N$  – кінцева множина транспортних вузлів,  $E$  – кінцева множина дуг графу; в якості вхідних величин задава-

ли відстань перевезення (швидкість або час). Для пошуку рішення пропонувалося використовувати методи мультиагентної оптимізації, що ґрунтуються на евристичних алгоритмах, однак оптимізація перевезень за наведеним в роботі алгоритмом можлива тільки за однією вхідною величиною [2].

Теорія графів використовується для завдання початкових умов під час моделювання транспортних потоків та систем, де моделюванню підлягають транспортні потоки автомагістралей. Для моделювання використовуються орієнтовані графи, задаються певні початкові умови, густина транспортного потоку на кожній дузі графу, а пошук оптимального рішення здійснюється за допомогою розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь [3].

М.В. Правдін, В.Я. Негрей, В.О. Подкопаєв [4] пропонують використовувати потокові орієнтовані графи обробки вантажів на залізниці і на автомобільному та річковому транспорті, де вузли – станції перевалки вантажів, а дуги орієнтованого графа – кількість вантажу (рис. 2).

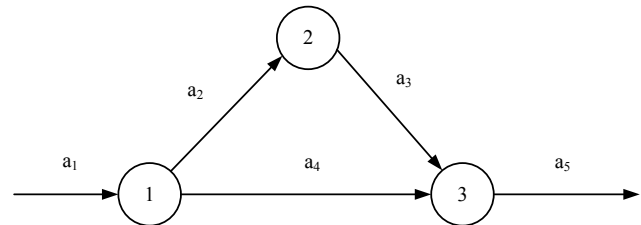


Рис. 2. Потоковий граф обробки вантажів

1, 2, 3 – транспортні вузли;  
 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  – обсяги вантажу між вузлами.

Для більш масштабних перевезень авторами пропонується використовувати полігон транспортної мережі, де вузли – пункти виробництва, перевалки, споживання, а дуги – відстань між ними (рис. 3).

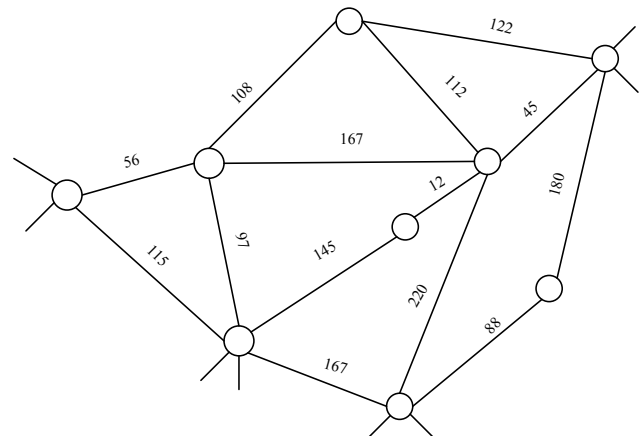


Рис. 3. Приклад полігону транспортної мережі

В цьому разі використовується неорієнтований граф. Також за умови визначеної вартості перевезень наводиться алгоритм пошуку оптимального плану перевезень [4].

Розширюючи сферу використання теорії графів на управління транспортом, М.В. Правдін та В.Я. Негрей на прикладі системи управління міськими пасажироперевезеннями пропонують використовувати теорію графів для побудови ієрархічної системи планування та організації перевезень пасажирів (рис. 4) та визначення показників інтегральної ефективності перевезень, які мають багаторівневу ієрархічну структуру та вигляд деревовидного графу [5].

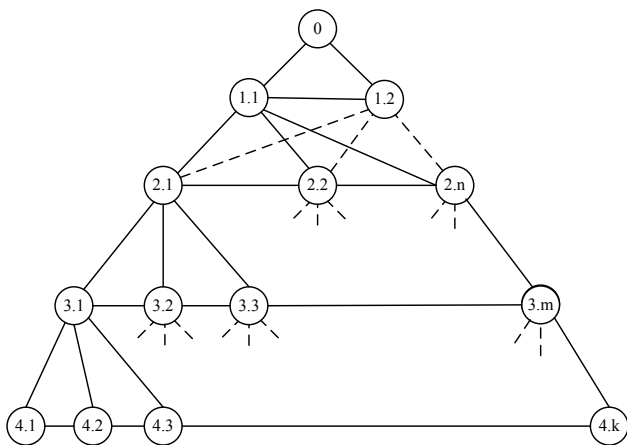


Рис. 4. Граф ієрархічної структури управління міськими пасажироперевезеннями

0 – Оперативний план роботи міського пасажирського транспорту; 1.1–1.2 – складання плану розподілу пасажиропотоку; 2.1–2.n – побудова оперативних планів роботи окремих видів міського транспорту; 3.1–3.m – плани роботи по окремих маршрутах; 4.1–4.k – плани роботи окремих одиниць рухомого складу.

Отже, використання теорії графів для вирішення завдань покращення транспортного обслуговування заслуговує на увагу, однак запропоновані моделі графів не відображають особливостей взаємодії транспортних підприємств у складі великих мереж.

Досліджуючи теорію складних мереж, І.О. Євін зазначає, що вони мають незначну кількість вузлів з великою чисельністю зв'язків, які мають назву хабів, саме останні і визначають властивості таких мереж. Локальну характеристику складних мереж надає коефіцієнт кластеризації, який характеризує ступінь взаємодії між собою найближчих сусідів цього вузла [6].

На основі дослідження широкого кола прикладних завдань застосування теорії графів на транспорті розглянемо можливості їх застосування під час моделювання мережеских структур.

Мережі транспорту характеризуються наявністю вузлів (акторів) з великою кількістю зв'язків (хабів) між підприємствами різних видів транспорту, постачальниками, посередниками, споживачами тощо. У процесі моделювання мережескої взаємодії транспортних підприємств важливими є найближчі партнери по

мережі. Ступінь взаємодії мережеских партнерів визначається за допомогою коефіцієнта кластеризації, який наочно ілюструє можливості встановлення прямих зв'язків між ними. Для мережеских структур на транспорті дуже важливими є зв'язки кожного вузла з найближчими партнерами для швидкого та ефективного взаємобміну ресурсами, технологіями, досвідом; взаємодопомоги у пошуку споживачів, реалізації спільних інвестиційно-інноваційних проєктів; взаєморозуміння під час відстоювання власних інтересів тощо.

У процесі дослідження транспортних потоків важливою характеристикою мережі є навантаження її вузлів, яке показує частку найкоротших шляхів, що проходять через цей вузол. У цьому разі під шляхом розуміють послідовність взаємозв'язків між вузлами мереж, до складу яких належать підприємства транспорту. Навантаження вузла з позицій теорії графів характеризує важливість вузла (актора) у мережі. Відтак, що більше навантаження на вузол, то вище його важливість для мережі та ступінь довіри до нього.

В основу комп'ютерного моделювання мережеских транспортних структур покладено зв'язки між вузлами, а саме підприємствами транспорту, які наводяться у вигляді матриць суміжності та матриць інцидентів з використанням булевої алгебри.

**Висновки.** Теорія графів допомагає моделювати взаємозв'язки між підприємствами та оптимізувати їх, є науковим підґрунтям для отримання мережеского ефекту від партнерської співпраці. Дуги орієнтованих графів ілюструють вплив одних підприємств транспорту на інші, доступ до інформації та ступінь повноважень у мережі. За рахунок застосування інформаційно-комунікаційних технологій відбувається віртуалізація мережеских взаємовідносин, яка призводить до зменшення важливості просторових зв'язків, підвищуючи цим якісні характеристики надання транспортних послуг. Відтак теорія графів у дослідженні мережеских структур на транспорті виявляє взаємозв'язки між їх учасниками, поведінка яких досліджується з врахуванням обмежень та можливостей, накладених мережами з метою наступної оптимізації структури останніх.

Подальші дослідження з цієї тематики будуть стосуватися графотеоретичного обґрунтування вибору мережеских партнерів, оцінки стійкості мережеских взаємовідносин між ними, розподілу мережеского капіталу, ресурсів, ризиків, визначення мережеских ефектів.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Авондо-Бодино Дж. Применение в экономике теории графов / Дж. Авондо-Бодино. – М. : Прогресс, 1966. – 160 с.
2. Ульяницкий Е.М. Информационные системы взаимодействия видов транспорта : учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / Е.М. Ульяницкий, А.И. Фило-

- ненков, Д.А. Ломаш. – М. : Маршрут, 2005. – 264 с.
3. Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учеб. пособие / А.В. Гасников, С.Л. Кленов, Е.А. Нурминский, Я.А. Холодов, Н.Б. Шамрай ; Приложения: М.Л. Бланк, Е.В. Гасникова, А.А. Замятин, В.А. Малышев, А.В. Колесников, А.М. Райгородский ; под ред. А.В. Гасникова. – М. : МФТИ, 2010. – 360 с.
  4. Правдин Н.В. Взаимодействие различных видов транспорта: примеры и расчеты / Н.В. Правдин, В.Я. Негрей, В.А. Подкопаев. – М. : Транспорт, 1989. – 208 с.
  5. Правдин Н.В. Взаимодействие различных видов транспорта в узлах / Н.В. Правдин, В.Я. Негрей. – Минск : Вышэйш. школа, 1977. – 296 с.
  6. Евин И.А. Введение в теорию сложных сетей / И.А. Евин // Компьютерные исследования и моделирование, 2010. – Т. 2. – № 2. – С. 121–141.