Боровик С.С.

Одеський національний морський університет

МЕТОДИКА РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ РУХУ ПАСАЖИРСКИХ СУДЕН

У роботі запропоновано метод розроблення та вибору оптимального маршруту руху пасажирських суден. Існуючі методи побудови маршрутів засновані на оптимізації фінансових критеріїв, а також критеріїв часу і відстаней. У сучасних умовах судноплавні компанії, що займаються організацією пасажирських перевезень, конкурують не тільки одна з одною, але й з іншими видами пасажирського транспорту. Ця конкуренція зумовлює необхідність пошуку такого критерію оптимальності, який враховує як потреби судновласника, так і пасажирів. Критерієм оптимальності в побудові маршруту може виступати комплексна оцінка привабливості портів. У результаті проведення експертної оцінки критеріїв привабливості, які відповідають як вимогам судновласника, так і вимогам пасажирів, виходить комплексна оцінка.

Як правило, ринок пасажирських транспортних послуг характеризується певною кількістю портів у регіоні або пунктами зупинок у випадку з річковими перевезеннями місцевого, приміського та міського значення. Під час побудови маршруту з множини портів вибирається сукупність, потім встановлюються зв'язки між парами портів і за допомогою завдання комівояжера визначається оптимальний маршрут. Потім вибирається інша сукупність портів, встановлюються зв'язки між парами портів і знову вирішується завдання комівояжера. Дані дії повторюються до тих пір, поки не утвориться сукупність оптимальних маршрутів, яка складається з достатньої кількості, на думку особи, що приймає рішення, різних маршрутів. Потім вирішується завдання вибору оптимального маршруту шляхом лінійного цілочисельного програмування. Критерієм оптимальності виступає значення цільової функції, отриманої під час побудови маршруту на попередньому етапі.

У підсумку виходить варіант маршруту, який забезпечує адекватність з точки зору реальної обстановки в даному регіоні.

Ключові слова: пасажирський маршрут, задача комівояжера, морська лінія.

Постановка проблеми. Швидкі темпи розвитку різних видів пасажирського транспорту зумовлюють необхідність подальшого вдосконалення системи пасажирських перевезень водним транспортом. Натепер вимоги пасажирів до водного транспорту в цілому і до маршрутів зокрема дещо інші, ніж, наприклад, 20–30 років тому. Під час складання схеми маршруту вирішальну роль відіграє вибір портів заходу або зупиночних пунктів (для міських та приміських маршрутів). Основні труднощі побудови маршруту полягають в оптимізації вибору послідовності портів (зупиночних пунктів – далі ЗП).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішенню різних питань, що стосуються побудови маршрутів роботи суден, присвячено значну кількість робіт. Зокрема, в роботі [1] розглянуто проблему вибору маршруту руху судна-контейнеровоза на фідерній ділянці контейнерної лінії на базі моделі часткового цілочисельного лінійного програмування. Рішення задачі полягає у визначенні оптимального маршруту для фідерного судна-контейнеровоза, в якій критерієм

оптимальності вибрана максимізація прибутку судноплавної компанії від перевезення контейнерів з урахуванням руху порожнього контейнерного обладнання з портів із надлишком у порти з нестачею. У дослідженні [2] пропонується метод вирішення задачі маршрутизації судів різної вантажопідйомності. Для знаходження рішення задачі пропонується використовувати двофазний алгоритм: на першому етапі виконується угруповання вершин для кожного майбутнього маршруту (кластеризація), на другому етапі – рішення задачі комівояжера для кожної отриманої групи. Критерієм оптимальності виступають витрати на перехід між портами.

У [3] запропонована узагальнена схема взаємодії системи «міська транспортна система – пасажирський порт/інфраструктура – круїзна/поромна лінія». Сформульовано і виконано графічне представлення форм організації маршрутної мережі. Для вирішення завдань стратегічного управління запропонована цільова функція, що забезпечує раціоналізацію маршрутної мережі за рахунок мінімізації вартості.

У роботі [4] пропонується методика побудови круїзного маршруту на підставі класичного завдання комівояжера, яка дозволяє розробляти оптимальні схеми круїзів по критерію інтенсивності прибутку, що синтезує фінансовий і часовий фактори.

У роботі [5] пропонується модель побудови пасажирської лінії, що базується на динамічному програмуванні, в якій ураховується величина пасажиропотоку і потреба у флоті. Параметром управління виступає величина витрат на утримання пасажирського флоту, необхідного для роботи на лінії.

Отже, з аналізу останніх досліджень бачимо, що розробка оптимального шляху базується на фінансових критеріях оптимальності. Серед пасажирів попит на той чи інший маршрут формує не лише вартість білету, а багато інших факторів, що не враховуються у фінансових критеріях оптимальності. Тому виникає необхідність у розробленні такої методики побудови і вибору оптимального водного пасажирського маршруту, в якій буде комплексно оцінені як потреби пасажирів, так і судновласника.

Постановка завдання. Метою дослідження є розроблення методу побудови та вибору оптимального маршруту руху пасажирських суден.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо метод побудови маршруту перевезення пасажирів водним транспортом на прикладі відомої задачі комівояжера. Класичний варіант завдання комівояжера формулюється так: мандрівний торговець повинен відвідати кожне із заданих міст один раз і повернутися в початкове місто. Критерієм оптимальності виступають витрати на поїздки. За рівної вартості поїздки на одиницю часу мінімум витрат буде в разі найліпшого маршруту.

Задача комівояжера може бути представлена як математична модель – графа $G = (V, E)$. Множина вершин $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ уграфі відповідає портам, а множина ребер $E = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ – зв'язку між парами портів. Кожному ребру E відповідає значення критерію вигідності маршруту [6, с. 110] (рис. 1). Необхідно побудувати такий маршрут, який буде найбільш вигідний як для судновласника, так і для пасажирів.

Цінність думки пасажирів не втрачає своєї актуальності в час, де основним критерієм попиту на послуги пасажирських суден є не тільки швидкість і час доставки, а й комфортні умови, доступність порту, безпека за оптимальної вартості. Судновласник же оцінює ефективність роботи судів з позиції властивих йому характеристик, таких як

кількість перевезених пасажирів, інтенсивність надходження прибутку і т.д. У використаних дотепер методиках побудови маршруту, критерії оптимальності не враховували сукупну оцінку думок двох сторін (судновласника і пасажирів). Для формалізації процесу визначення послідовності включення портів у маршрут доцільно використувати метод експертних оцінок. Необхідно комплексно оцінити привабливість портів для пасажирів і вигоду для судновласників.

Рис. 1. Симетрична ($v_{ij} = v_{ji}$) модель задачі комівояжера

1. На першому етапі побудови маршруту із сукупності всіх портів і ЗП вибираються ті, які увійдуть у маршрут.

Вибір портів або ЗП, які увійдуть до майбутнього маршруту, здійснюється в залежності від виду маршруту:

– для ліній і рейсів тільки з діловими пасажирів – на підставі наявності пасажиропотоку з/в ці порти або ЗП;

– для туристичних ліній і рейсів – за наявністю об'єктів розваги та туризму поблизу портів або ЗП.

Кількість портів або зупиночних пунктів залежить від мети пересування пасажирів, бажаного часу в дорозі. Занадто велика кількість портів заходів або ЗП збільшує час у дорозі, що небажано для ділових пасажирів. Для туристів час у дорозі не такий важливий, проте в дослідженні [4, с. 210] визначено, що, наприклад, для круїзу оптимальним варіантом є, як для туристів, так і для судновласника, тривалість круїзу 8–14 днів з 7–10 портами заходів. Кількість портів заходів або ЗП доцільно визначати для кожного маршруту індивідуально.

2. На наступному етапі необхідно комплексно оцінити привабливість портів заходу або ЗП як для пасажирів, так і для судновласника. Етап включає

в себе вибір критеріїв оцінювання та проведення експертизи.

Як правило, пасажирські перевезення є мультимодальними, здійснюються більше ніж одним видом транспорту. У виборі виду транспорту і маршруту для подорожі пасажирів враховують такі критерії, як: вартість перевезення, час у дорозі, комфорт, безпека, ритмічність і регулярність, час на очікування в пересадочних вузлах [7, с. 124; 8, с. 111], доступність точок відправлення. Для пасажирів, які подорожують з туристичною метою, важливу роль відіграє також наявність на шляху проходження туристичних об'єктів. Для забезпечення конкурентоспроможності маршруту, що розробляється, потрібно орієнтуватися на потреби пасажирів.

Пасажиропотік місцевих і міжнародних туристичних ліній складається в основному з туристів, але ділові пасажирів також користуються цими маршрутами. Привабливість інфраструктури міста включає в себе наявність культурно-розважальних і ділових об'єктів, розвинену транспортну інфраструктуру, доступність інформації, швидкість документального оформлення в порту для міжнародних маршрутів.

У критерій доступності базового порту входять: розташування порту, відстань від з/д вокзалу або аеропорту до порту, наявність зручного пасажирського терміналу.

Велике значення для ділових пасажирів і туристів, які ознайомлюються з містами відвідування самостійно, має рівень інтеграції системи громадського транспорту, який включає в себе наявність:

- зупиночних пунктів громадського транспорту біля порту;
- зручних пішохідних доріжок до пунктів зупинок;
- системи інформування пасажирів про розклад руху громадського транспорту на зупиночному пункті;
- наявність суміщеного вокзалу, наприклад, річковий або морський з автобусним.

Чим розвиненіша система громадського транспорту міста, тим менше часу пасажирів витрачають на пересадку з одного виду транспорту на інший, що також є критерієм привабливості й комфорту маршруту.

Круїзні туристи під час вибору круїзу звертають увагу на наявність у портах заходу культурно-історичних об'єктів, які можна відвідати на екскурсії по місту або передмістю. Також не останню роль відіграє рівень безпеки, як у портах заходу, так і в прилеглих містах.

Що стосується приміських і міських водних маршрутів, то тут для пасажирів на перше місце виходить зручність виду транспорту. Серед критеріїв привабливості слід зазначити такі:

- доступність до місць постійного або тимчасового проживання, до місць відпочинку і розваг, до об'єктів туризму;
- швидкість для ділових пасажирів;
- рівень інтеграції з громадським транспортом.

Критерій вартості переходу між портами слід розглядати з точки зору судновласника. Будемо виходити з того, що в разі зниження вартості переходу між портами буде знижуватися і ціна поїздки для пасажирів, в іншому випадку маршрут не буде конкурентоспроможним. На вартість переходу між портами впливає відстань і швидкість.

Також до критеріїв, що відображають рівень витрат судновласника, відносяться рівень портових зборів і наявність на шляху проходження каналів або проток, за проходження яких може стягуватися додаткова плата.

У загальному вигляді критерії оцінювання портів для різних маршрутів представлені в табл. 1. Слід зазначити, що критерії привабливості для судновласника носять постійний характер. Однак критерії привабливості для пасажирів можуть змінюватися під впливом зовнішніх факторів. Оказати вплив можуть зміни в політичній та економічній ситуації в регіоні, впровадження інноваційних технологій у транспортну систему, зміна особистих уподобань населення. Проведення систематичного анкетування дозволить оперативно реагувати на зміну переваг пасажирів і вносити зміни у вибір критеріїв привабливості з боку пасажирів під час проведення комплексної оцінки.

Після вибору критеріїв для оцінювання проводиться експертиза. Експертами виступають фахівці судноплавної компанії і пасажирів. Оцінки присвоюються за 10-бальною шкалою, від 0 до 10, де 10 – це найвагоміша оцінка. Для критеріїв, які мають кількісне значення (портові збори, витрати на перехід, оплата за проходження каналів або протоків), складається шкала відповідності значення (або діапазону значень, якщо портів більше 10-ти) критерію балу.

На наступному етапі здійснюється моделювання оптимального маршруту на підставі задачі комівояжера, але з деякими коригуваннями, що відображають умови й особливості експлуатації пасажирських суден.

На підставі вищевикладеного до моделі міських, приміських, місцевих, міжнародних туристичних ліній та круїзних маршрутів ставляться такі вимоги:

– відвідування всіх розглянутих портів є обов'язковим, оскільки порти підбираються за наявністю пасажиропотоку та туристичної привабливості;

– маршрут повинен бути замкнутий, судно може зайти в кожен порт тільки один раз;

– маршрут повинен починатися і закінчуватися в базовому порту або ЗП;

– загальна кількість пасажирів, які здійснюють посадку на судно в базовому порті, не повинна бути більше, ніж пасажиромісткість;

– загальна кількість пасажирів, які здійснюють посадку на судно протягом маршруту, не повинна бути більше, ніж пасажиромісткість судна, з урахуванням висадки пасажирів.

Необхідно визначити оптимальну послідовність пар портів на маршруті.

Критерієм оптимальності виступає зворотна величина від комплексної оцінки ($K_{ij}^{\text{експерт.}}$) привабливості включення портів у схему і, відповідно, переходу між парою портів:

$$K_{ij} = \frac{1}{K_{ij}^{\text{експерт.}}} \quad (1)$$

Таке перетворення пов'язано з тим, що комплексна оцінка дає найбільше значення, а в задачі комівояжера цільова функція мінімізується.

Позначимо вершини (рис. 1) числами натурального ряду $1, 2, \dots, m$, а ребро (ділянка шляху), яке виходить з вершини i і входить в вершину j , позначимо парою (i, j) .

Математична модель буде мати такий вид:

$$\theta = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m K_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (2)$$

$$x_{kj} = 1, (k \in m), \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, (j = 1, 2, \dots, m), \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, (i = 1, 2, \dots, m), \quad (5)$$

$$u_i - u_j + m \cdot x_{ij} \leq m - 1, \quad i, j = \overline{1, m}, \quad (6)$$

$$\sum_{k \in m} p_i^{\text{noc.}} \cdot x_{kj} \leq P, (k \in m), \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^m p_i^{\text{noc.}} \cdot x_{ij} = P - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m p_i^{\text{noc.}} \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m p_j^{\text{вус.}} \cdot x_{ji}, (i, j = 1, 2, \dots, m), \quad (8)$$

де m – кількість портів заходу, p_{ij} – кількість пасажирів, які слідує з порту i у порт j , чол., $p_i^{\text{noc.}}$ – кількість пасажирів, які здійснюють посадку в порту i , чол., $p_j^{\text{вус.}}$ – кількість пасажирів, які висаджуються в порту j , чол., P – пасажиромісткість судна, чол., u_i, u_j – речові значення, що визначаються в процесі вирішення задачі, параметр управління:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо судно здійснює перехід} \\ & \text{із порту } i \text{ в порт } j, \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

Представлена сукупність обмежень (3) – (8) відображає зміст умов, що сформувані в постановці завдання.

Таблиця 1

Критерії привабливості портів і переходів між ними з точки зору пасажирів і судновласника

Місцеві та міжнародні туристичні лінії	Круїз	Внутрішньоміські, приміські	
		турист	місцевий житель
З точки зору пасажирів/туриста			
доступність базового порту, приваблива інфраструктура міста		доступність до місця тимчасового проживання	доступність до місця проживання, роботи, до місць відпочинку і розваг
наявність культурних та історичних цінностей		доступність до туристичних об'єктів (у тому числі до місць відпочинку і розваг)	швидкість
інтеграція із системою громадського транспорту	безпека	інтеграція із системою громадського транспорту	інтеграція із системою громадського транспорту
З точки зору судновласника			
портові збори		Плата за користування причалом	
витрати на перехід із порту в порт			
наявність на шляху каналів (проток), проходження яких вимагає оплати		наявність на шляху мостів обмежує вибір судна	

(3) – обмеження, що забезпечує включення базового порту в маршрут.

(4), (5) – обмеження, що забезпечують один захід судна в порт і один вихід судна з порту.

(6) – обмеження, що забезпечує замкнутість маршруту та відсутність внутрішніх кіл.

(7) – кількість пасажирів, що здійснюють посадку в базовому порту, не повинна перевищувати пасажиромісткість судна.

(8) – кількість пасажирів, що здійснюють посадку в кожному порту, не повинна перевищувати доступну пасажиромісткість, яка визначається шляхом віднімання від загальної пасажиромісткості судна кількості пасажирів, які здійснили посадку в попередніх портах, і додавання загальної кількості пасажирів, які вже зійшли із судна. Це обмеження справедливо лише для тих маршрутів, протягом яких здійснюється змінність пасажирів. Для круїзних маршрутів це обмеження не розглядається.

Після визначення оптимального маршруту із заданої кількості портів необхідно повернутися на етап підбору портів. Підбирається відмінна від попереднього варіанту сукупність портів, що знаходяться в даному регіоні. Визначаються зв'язки між парами портів, що входять до вибраної сукупності, і комплексний критерій привабливості кожного порту. Потім вирішується завдання комівояжера. Етапи 1–3 повторюються до тих пір, поки не буде отримана вся, на думку особи, що приймає рішення, сукупність маршрутів.

На базі сукупності маршрутів здійснюється пошук оптимального варіанту з використанням економіко-математичного цілочисельного лінійного програмування з булевими змінними. Критерієм оптимальності виступає значення цільової функції θ , яке було отримано в результаті рішення задачі комівояжера під час визначення оптимального маршруту i . У підсумку отримуємо варіант, що забезпечує рішення, яке реально складається з виробничої обстановки в даному регіоні.

$$Z = \sum_{i=1}^m \theta_i x_i \rightarrow \min \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i x_i = T, (i = 1, 2, \dots, n), \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1, (i = 1, 2, \dots, n), \quad (11)$$

$$x_i = \{0; 1\}, \quad (12)$$

де n – кількість оптимальних маршрутів, що були визначені на попередньому етапі, t_i – тривалість маршруту i , діб., T – заданий період експлуатації, діб., параметр управління:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо судно закріплюється за маршрутом } i, \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

(10) – обмеження, що тривалість маршруту не більше, ніж заданий період експлуатації;

(11), (12) – обмеження, що відображають можливі значення параметру управління.

Рішення задачі (9) – (12) дозволить судновласнику прийняти рішення щодо експлуатації пасажирського судна або флоту на оптимальному маршруті, що був вибраний серед сукупності маршрутів, та тривалість якого не перевищуватиме заданого часу.

Висновки. У результаті проведених досліджень отримано методику розроблення та вибору оптимального маршруту для роботи пасажирських суден, що складається з таких етапів:

- етап 1 – вибір сукупності портів для побудови маршруту;
- етап 2 – встановлення зв'язків між парами портів шляхом вирішення двох підзадач:
- вибір критеріїв оцінювання;
- проведення експертизи для отримання комплексної оцінки.
- етап 3 – рішення задачі комівояжера, в результаті котрої отримують оптимальний маршрут із сукупності портів, що розглядається;
- етап 4 – повторення етапів 1–3, допоки не буде отримана сукупність оптимальних маршрутів;
- заключний етап – рішення задачі вибору оптимального маршруту із сукупності маршрутів.

Основна перевага запропонованого методу в тому, що він гармонійно поєднує досвід і знання особи, що приймає рішення, зі строгими математичними методами й алгоритмами.

Даний напрям носить назву формалізовано-евристичного і в даний час вважається пріоритетним, оскільки реалізує людино-машинні процедури.

Список літератури:

1. Савельєва І.В., Дрожжин О.Л. Моделювання оптимального маршруту руху фідерних контейнеровозів. Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія : Транспортні системи і технології. 2014. Вип. 25. С. 162–170.
2. Головцов Д.Л. Задача маршрутизации судов с различной грузоподъемностью морского транспортного комплекса арктической зоны России. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 6 (34). С. 85–92.

3. (2019). Forecasting of the route network of ferry and cruise lines based on simulation and intelligent transport systems. *Transport problems* / N. Maierov et al. Volume 14. Issue 2. P. 111–121. doi: <https://doi.org/10.20858/tp.2019.14.2.10>
4. Михайлова Ю.В. Обеспечение устойчивого функционирования судоходных предприятий на круизном рынке, который формируется в Черноморском регионе : дисс. ... канд. экон. наук : 08.00.04 ; ИПРЕД НАНУ. Одесса, 2009. 289 с.
5. Сандулов С.Г. Организация перевозок пассажиров речным транспортом в районах с ограниченными транспортными связями : дисс. ... Новосибирская государственная академия водного транспорта, 2009.
6. Захаров В.В., Мугайских А.В. Динамическая адаптация генетического алгоритма маршрутизации транспорта на больших сетях. УБС. 2018. № 73. С. 108–133.
7. Зарецкая Е.В., Жаворонков Н.А., Исаева А.А. Перспективы развития недоиспользованного транспортного и туристического потенциала внутренних водных путей за счёт новых мультимодальных технологических решений. *Научные проблемы водного транспорта*. 2019. № 59. С. 120–126.
8. Технология построения оптимального маршрута при организации мультимодальных пассажирских перевозок с учетом выбора места пребывания. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование* / Н.В. Кроль и др. 2019. № 2 (62). С. 109–118. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).

Borovyk S.S. METHODOLOGY OF DEVELOPMENT AND SELECTION OF THE OPTIMAL ROUTE OF PASSENGER VESSELS

The paper proposes a method for developing and selecting the optimal route for ships. Existing methods of route construction are based on the optimization of financial criteria, as well as time and distance criteria. In modern conditions, shipping companies engaged in the organization of passenger transport, compete not only with each other but also with other types of passenger transport. This competition necessitates the search for an optimality criterion that takes into account both the needs of the shipowner and the passengers. A comprehensive assessment of the attractiveness of ports can serve as a criterion for optimality in the construction of the route. As a result of an expert assessment of the attractiveness criteria, which meet both the requirements of the shipowner and the requirements of passengers, we obtain a comprehensive assessment. As a rule, the market of passenger transport services is characterized by a certain number of ports in the region or stopping points in the case of river transport of local, suburban and urban significance. When constructing a route from a plurality of ports, a set is selected, then connections are established between the pairs of ports, and the optimal route is determined using the salesman task. Then another set of ports is selected, connections between pairs of ports are established and again the task of the salesman is solved. These actions are repeated until a set of optimal routes is formed, consisting of a sufficient number, in the opinion of the decision-maker, of various routes. Then the problem of choosing the optimal route by linear integer programming is solved. The criterion of optimality is the value of the objective function obtained during the construction of the route at the previous stage. The result is a variant of the route, which provides adequacy in terms of the real situation in the region.

Key words: passenger route, salesman task, sea line.