

ПРОХОРОВ В.М., к.т.н., доцент,
ПАРХОМЕНКО Л.А., д.т.н., доцент,
КАЛАШНІКОВА Т.Ю., к.т.н., доцент,
СЛОБОДЯНЮК О.А., магістрант
(Український державний університет залізничного транспорту)



Формування моделі Transit Network Design для швидкісного залізничного пасажирського сполучення в контексті парадигми цифрових двійників транспортних систем.

У статті розглянуто формування моделі Transit Network Design для оптимізації маршрутів швидкісних пасажирських поїздів на залізничній мережі з урахуванням прогнозованого попиту на перевезення між станціями. Основну увагу приділено побудові математичного апарату, що дозволяє генерувати маршрути без заздалегідь заданого їх переліку, використовуючи лише топологію мережі та матрицю очікуваного попиту. Запропонована модель відходить від статичного планування, враховуючи не лише базові значення попиту, але й функцію зниження привабливості поїздки залежно від кількості проміжних зупинок між станцією відправлення та призначення. Це дозволяє об'єктивно оцінювати гіпотетичні маршрути та формувати раціональну мережу руху швидкісних поїздів з погляду як операційної ефективності, так і пасажирської привабливості.

У моделі запропоновано цільову функцію, спрямовану на максимізацію сумарного реалізованого попиту або доходу оператора транспортних послуг, забезпечуючи оцінку впливу топологічних рішень (конфігурації маршрутів, розміщення зупинок, довжини поїздок) на економічну ефективність системи. Цей підхід забезпечує наукову обґрунтованість і прозорість процесу проектування мережі руху. Також детально розглянуто можливість застосування парадигми цифрових двійників для симуляційного відтворення функціонування мережі, що дозволяє аналізувати альтернативні варіанти розкладів, топологій і політики маршрутизації у масштабі, близькому до реального часу. Це забезпечує основу для подальшої автоматизації формування мережі руху та її відтворюваності в сучасному цифровому середовищі.

Ключові слова: оптимізація маршрутів, швидкісні перевезення, Transit Network Design, попит на пасажирські перевезення, цифровий двійник, математичне моделювання, залізничний транспорт.

Постанова проблеми.

Сучасні пасажирські залізничні перевезення функціонують в умовах високої конкуренції з іншими видами транспорту та зростаючих вимог до швидкості, регулярності та комфорту подорожей. Одним із ключових факторів,

що визначає привабливість маршруту для пасажирів, є кількість проміжних зупинок між пунктами відправлення та призначення. Надмірна кількість зупинок збільшує час поїздки та може призводити до втрати частини пасажиропотоку, що безпосередньо знижує економічну ефективність та завантаженість поїздів.

© ПРОХОРОВ В.М., ПАРХОМЕНКО Л.А., КАЛАШНІКОВА Т.Ю., СЛОБОДЯНЮК О.А., 2025

Разом з тим реальна експлуатаційна ситуація ускладнюється невизначеністю попиту, варіативністю інтенсивності руху, зміною розкладів та іншими динамічними чинниками, які важко точно врахувати на етапі планування. Традиційні підходи до моделювання часто спираються на усереднені або спрощені параметри та не дозволяють оперативно адаптувати маршрутну політику до змін реального середовища.

У цьому контексті актуальним стає впровадження цифрових двійників транспортної системи, які забезпечують синхронізацію моделей з даними реального часу, дозволяють моделювати альтернативні варіанти маршрутів та оцінювати наслідки для пасажиропотоку, навантаження інфраструктури та якості обслуговування. Використання цифрового двійника створює можливість оцінювати вплив зміни кількості зупинок ще до їх впровадження, мінімізувати ризики неефективних рішень та підвищити точність прогнозування.

Отже, виникає науково-практична задача розроблення підходу до оцінки та оптимізації маршрутної політики з урахуванням реакції пасажирського попиту на кількість зупинок та можливості інтеграції отриманої моделі у середовище цифрового двійника для підтримки адаптивного та обґрунтованого управління залізничними перевезеннями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У статті [1] запропоновано багаторівневу архітектуру цифрового двійника залізничної мережі, що включає підсистеми інфраструктури, рухомого складу та пасажиропотоків. Автори показують, що така модель дозволяє здійснювати моніторинг і прогнозування стану мережі в реальному часі. Проте в роботі не враховано обмеження на масштабування для великих мереж.

У статті [2] розглянуто інтеграцію цифрового двійника з моделями прогнозування пасажиропотоків за допомогою глибинного навчання. Результати демонструють підвищення точності прогнозів та ефективності планування руху швидкісних поїздів. Недоліком є брак довготривалих даних для тренування моделей.

У статті [3] запропоновано підхід до спільної оптимізації «маршрут + зупинки + seat-allocation / ціноутворення» для високошвидкісних залізниць, з урахуванням еластичного (залежного від ціни) попиту. Автори демонструють, що інтеграція рішення про трасування поїздів, їх зупинки, розподілу місць і ціни дає змогу краще узгодити пропозицію з попитом, підвищити заповнюваність та дохід.

У статті [4] побудовано модель «stop-plan + timetable + seat allocation» з урахуванням стохастичного (часовозалежного) пасажиропотоку — з метою адаптації курсування до динаміки попиту. Це дозволяє краще підлаштовувати розклад до реального попиту та зменшувати невикористані місця.

У статті [5] запропоновано метод гібридної періодичності + додавання позаперіодичних поїздів (hybrid periodic timetable) з урахуванням варіативності попиту та обмежень на рухомий склад — для підвищення гнучкості та орієнтації на пасажирів. Це дозволяє змінювати розклад залежно від часу доби / дня / попиту.

У статті [6] розглянуто оптимізаційні рішення щодо перепланування розкладу (rescheduling) у разі збоїв або зміни умов з розглядом ресурсних обмежень мережі. Це дає змогу швидко адаптувати рух, зберігаючи якість обслуговування та пропускну здатність.

У статті [7] досліджено оптимізацію потужності поїздів щодо попиту: наприклад, використання меншої кількості вагонів у години з меншим попитом і більше — у пікові, щоб ефективно використовувати ресурси та зменшити невикористані місця.

Таким чином, основними викликами залишаються інтеграція різнорідних даних, масштабування моделей на рівень мережі, прогнозування динамічних змін у пасажиропотоках та врахування зовнішніх факторів для підвищення точності і надійності цифрових двійників у високошвидкісних залізничних системах.

Формулювання цілей. Метою дослідження є розробка математичної моделі для оптимізації маршрутної політики швидкісних пасажирських перевезень на залізничній мережі з урахуванням впливу кількості проміжних зупинок на попит пасажирів та загальну економічну ефективність роботи перевізника. Основне завдання полягає у створенні інструменту, який дозволить автоматично генерувати можливі маршрути руху на основі топології мережі, оцінювати їх з точки зору завантаження, доходності та привабливості для пасажирів, а також забезпечувати відбір оптимальних рішень.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- сформулювати математичний опис пасажирського попиту на основі базових прогнозних даних та функції зниження попиту залежно від кількості зупинок між станціями;

- розробити механізм генерації маршрутів без заздалегідь фіксованого набору варіантів;

– запропонувати цільову функцію, яка максимізує сумарний дохід або обсяг задоволеного попиту на мережі;

– забезпечити можливість реалізації моделі в середовищі цифрового двійника для адаптивного аналізу маршрутних рішень у реальному або наближеному до реального масштабі часу.

Реалізація зазначених завдань дозволить підвищити точність прогнозування, скоротити ризики неефективних рішень та забезпечити науково обґрунтовану підтримку процесів планування швидкісних пасажирських перевезень.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Поставлені цілі практично повністю відповідають класу задач, які формуються як задачі дизайну мережі (англ. Transit Network Design, TND) [8]. Проблеми проектування мережі маршрутів транспорту (в першу чергу пасажирського і громадського) охоплюють комплексне математичне завдання оптимізації, що полягає у визначенні ідеального набору маршрутів, їхньої частоти та розкладу. Основна мета полягає у знаходженні найкращого балансу між мінімізацією експлуатаційних витрат і максимізацією прибутків для транспортного оператора та максимізацією рівня обслуговування (швидкість, зручність, мінімум пересадок) для пасажирів.

Як було зазначено вище, проблеми проектування мережі маршрутів транспорту (TND) охоплюють комплексне математичне завдання оптимізації, що полягає у визначенні ідеального набору маршрутів, їхньої частоти та розкладу з метою досягнення найкращого балансу між мінімізацією витрат оператора та максимізацією рівня обслуговування пасажирів. Парадигма цифрових двійників (англ. Digital Twins) виводить вирішення цього завдання на новий рівень, оскільки віртуальна копія системи, що отримує дані в реальному часі, дозволяє динамічно коригувати та прогнозувати вплив змін у мережі маршрутів, забезпечуючи безперервну оптимізацію транспортної системи.

Розглянемо математичну постановку задачі оптимізації схем оберту швидкісних пасажирських поїздів шляхом максимізації задоволення попиту на швидкісні пасажирські перевезення. Нехай задана залізнична мережа як неорієнтований граф $G = (V, E)$, де V — множина станцій, E — множина ділянок між станціями. Для ребра $(u, v) \in E$ відома довжина $l_{uv} > 0$ (у км).

Матриця базового прогнозного попиту:

$$D = [d_{ij}], \quad d_{ij} \geq 0, \quad i, j \in V, i \neq j, \quad (1)$$

де d_{ij} — кількість пасажирів, які бажають за період (наприклад, за добу) їхати з i в j .

Параметри моделі:

C — місткість одного поїзда (пасажирів);

N_{sets} — кількість доступних составів;

v — типова крейсерська швидкість (км/год);

τ_{stop} — середній час стоянки на зупинці (год);

T_{buffer} — технологічний буфер на оборот (год);

ρ_0 — базова допустима щільність зупинок (остановок на км);

$\beta > 0$ — параметр чутливості попиту до перевищення щільності.

Далі розглянемо формалізацію маршрутів. Маршрут r — простий шлях у графі:

$$r = (v_0, v_1, \dots, v_k), \quad v_s \in V, \text{ ці } v_s \text{ різні.} \quad (2)$$

Множина кандидатних маршрутів (після генерації з графа) позначимо $\mathcal{R}$.

Для маршруту r і для пари станцій i, j (які лежать на маршруті r у правильному порядку) визначаємо:

$n_{ij}(r)$ — кількість проміжних зупинок між пунктами i і j на маршруті r (тобто число станцій між i і j);

$L_{ij}(r)$ — довжина підшляху від i до j по маршруту r :

$$L_{ij}(r) = \sum_{(u,v) \in P_{ij}(r)} l_{uv}, \quad (2)$$

де $P_{ij}(r)$ — множина ребер на підшляху $i \rightarrow j$ у маршруті r .

Повна довжина маршруту:

$$\ell_r = \sum_{s=0}^{k-1} l_{v_s v_{s+1}}; \quad (3)$$

загальна кількість зупинок маршруту n_r (наприклад, кількість вузлів у списку зупинок мінус 1);

Час одного повного обороту (туди й назад):

$$\tau_r^{\text{turn}} = 2 \cdot \frac{\ell_r}{v} + n_r \cdot \tau_{\text{stop}} + T_{\text{buffer}}. \quad (4)$$

Щільність зупинок для пари i, j на маршруті r :

$$\rho_{ij}(r) = \frac{n_{ij}(r)}{L_{ij}(r)}. \quad (5)$$

Важливим елементом моделі повинна стати функція коригування попиту. Для більшої реалістичності моделі доцільно застосувати плавну функцію множника $k_{ij}(r) \in (0, 1]$, яка при $\rho_{ij}(r) \leq \rho_0$ близька до 1, а при зростанні $\rho_{ij}(r)$ меншає. З метою гладкості та диференційовності доцільно використати *softplus*-аппроксимацію для від'ємної частини:

$$\text{softplus}(x) = \ln(1 + e^x). \quad (6)$$

Тоді рекомендований множник:

$$k_{ij}(r) = \exp(-\beta \text{softplus}(\rho_{ij}(r) - \rho_0)). \quad (7)$$

Ця формула задає однолінійний вираз (без кускових визначень) і задовольняє інтуїтивним вимогам:

$$\begin{array}{ll} \text{якщо} & \rho_{ij}(r) \ll \rho_0, \\ \text{softplus}(\rho_{ij}(r) - \rho_0) \approx 0 & \text{і } k_{ij}(r) \approx 1, \end{array} \quad \text{то}$$

$$\begin{array}{ll} \text{якщо} & \rho_{ij}(r) \gg \rho_0, \\ \text{softplus}(\rho_{ij}(r) - \rho_0) \approx \rho_{ij}(r) - \rho_0 & \text{і} \\ k_{ij}(r) \approx \exp(-\beta(\rho_{ij}(r) - \rho_0)). & \end{array}$$

Скоригований попит, який забезпечує маршрут r для пари $i \rightarrow j$:

$$\tilde{d}_{ij}(r) = d_{ij} k_{ij}(r). \quad (8)$$

Змінні моделі

Для кожного маршруту $r \in \mathcal{R}$ вводимо:

$x_r \in \{0, 1\}$ — індикатор запуску маршруту r (1 — запускаємо, 0 — ні);

$f_r \geq 0$ — частота рейсів маршруту r за період (наприклад, рейсів на добу);

$z_{r,ij} \in \{0, 1\}$ — індикатор: маршрут r обслуговує пару $i \rightarrow j$ як обрана альтернатива (1 — так);

$\tilde{S}_{ij} \geq 0$ — реально перевезена кількість пасажирів з i в j .

Параметри, що передобчислюються:

$\delta_{r,ij} \in \{0, 1\}$ — індикатор того, що маршрут r проходить через i та j у правильному порядку;

$\tilde{d}_{ij}(r)$ — скоригований попит (як вище);

C — місткість поїзда;

$f_r^{\max}$ — максимальна допустима частота маршруту r .

Цільова функція

Базова задача — максимізація сумарного перевезеного (скоригованого) попиту або доходу. Запишемо загальну форму з урахуванням доходу:

$$\max Z = \sum_{i \neq j} p_{ij} \tilde{S}_{ij} - \sum_{r \in \mathcal{R}} (c_r^{\text{var}} f_r + c_r^{\text{fix}} x_r), \quad (9)$$

де p_{ij} — середній дохід з одного пасажирів на парі $i \rightarrow j$, c_r^{var} — змінні витрати на один рейс маршруту r (наприклад, пропорційні пробігу), c_r^{fix} —

фіксовані витрати на запуск маршруту r . Для простоти можна взяти $p_{ij} \equiv 1$ і відкинути витрати, якщо мета — максимізація покриття.

Problem, MILP) при умові попереднього обчислення параметрів $\tilde{d}_{ij}(r)$.

Перш за все необхідно ввести технічні обмеження, які забезпечують коректність запуску та обслуговування маршрутів:

$$z_{r,ij} \leq x_r, \quad \forall r \in \mathcal{R}, \forall i \neq j. \quad (10)$$

$$z_{r,ij} \leq \delta_{r,ij}, \quad \forall r, i, j. \quad (11)$$

(тобто $z_{r,ij}$ може бути 1 лише якщо маршрут запущено і маршрут проходить через пару.)

Наступне обмеження необхідне для забезпечення коректності вибору альтернатив.

Опціонально моделюємо, що для кожної пари $i \rightarrow j$ вибирається не більше однієї швидкісної альтернативи:

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} z_{r,ij} \leq 1, \quad \forall i \neq j. \quad (12)$$

(Як альтернатива, дозволяємо розподіл пасажирів між кількома маршрутами, вводячи частки).

Наступне обмеження повинне забезпечити коректне врахування реалізованих пасажиропотоків. Потенційне покриття (якщо вибрана альтернатива):

$$S_{ij}^{\text{pot}} = \sum_{r \in \mathcal{R}} \tilde{d}_{ij}(r) z_{r,ij}. \quad (13)$$

Реально перевезена кількість:

$$\tilde{S}_{ij} \leq S_{ij}^{\text{pot}}, \quad \forall i \neq j. \quad (14)$$

Розглянемо також місткість рейсів. Якщо маршрут r обрано для пари $i \rightarrow j$, реальний перевіз не може перевищувати сумарної місткості рейсів:

$$\tilde{S}_{ij} \leq \sum_{r \in \mathcal{R}} C f_r z_{r,ij}, \quad \forall i \neq j. \quad (15)$$

Далі введемо необхідні обмеження, які накладаються на змінні моделі. Нижче наведено набір обмежень, що перетворюють дану задачу на задачу змішаного-цілочисельного лінійного програмування (англ. Mixed Integer Linear Programming). Наступне обмеження спрямоване на коректне врахування ресурсів составів:

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} f_r \tau_r^{\text{turn}} \leq N_{\text{sets}}. \quad (16)$$

при цьому повинні забезпечуватись наступні межі та типи змінних:

$$0 \leq f_r \leq f_r^{\text{max}} x_r, \quad f_r \in \mathbb{R}_{\geq 0}; \quad (17)$$

$$x_r \in \{0,1\}, \quad z_{r,ij} \in \{0,1\}, \quad \tilde{S}_{ij} \geq 0. \quad (18)$$

Розглянемо також додаткові умови та зауваження щодо реалізації запропонованої моделі:

1. Якщо множина всіх простих шляхів $\mathcal{R}$ генерується заздалегідь (наприклад, алгоритмом k-shortest paths), то всі параметри $n_{ij}(r), L_{ij}(r), \rho_{ij}(r), k_{ij}(r), \tilde{d}_{ij}(r), \ell_r, \tau_r^{\text{turn}}$ можна передобчислити. Тоді задача зводиться до MILP (за умови, що f_r можуть бути неперервними або цілочисельними).

2. Якщо ж потрібно, щоб модель сама синтезувала маршрути без попередньої генерації, то застосовують колонну генерацію або комбінаторні підходи; це значно ускладнює модель і потребує субзадач для пошуку шляхів з позитивними зведеними цінами.

3. Параметри β і ρ_0 слід калібрувати на історичних даних або встановлювати експертно. Для чутливого аналізу рекомендовано проводити варіацію $\beta \in [0.1, 5]$ та ρ_0 у розумних межах відповідно до мережі.

Наведемо схему обчислення для однієї пари $i \rightarrow j$ і одного кандидата r :

$$\rho_{ij}(r) = \frac{n_{ij}(r)}{L_{ij}(r)}, \quad k_{ij}(r) = \exp(-\beta \ln(1 + e^{\rho_{ij}(r)})) \quad (19)$$

$$\tilde{d}_{ij}(r) = d_{ij} k_{ij}(r), \quad S_{ij}^{\text{pot}} = \sum_r \tilde{d}_{ij}(r) z_{r,ij}. \quad (20)$$

Наведена схема обчислень демонструє послідовність кроків, за якою модель визначає, яку

частину попиту між конкретною парою станцій може потенційно забезпечити кожний кандидатний маршрут. Спершу оцінюється щільність зупинок на маршруті — показник, що характеризує рівень його прямої та відповідності вимогам швидкісного руху.

Далі визначається скоригований попит для конкретного маршруту, який відображає реалістичний обсяг пасажирів, що оберуть даний напрямок за умови його фактичної конфігурації. Потенційно можливий обсяг обслуговування формується шляхом підсумовування внесків усіх маршрутів, що підходять для даної пари станцій, з урахуванням бінарного вибору маршруту в оптимізаційній моделі. Таким чином, модель оцінює не лише якість кожного окремого маршруту, а й його роль у загальній конфігурації мережі.

У підсумку така схема дозволяє чітко структурувати взаємозв'язок між топологічними характеристиками маршрутів, їх привабливістю для пасажирів, можливими обсягами перевезень і подальшим вибором частот курсування. Запропонований підхід забезпечує узгодженість між рішеннями щодо відкриття маршрутів і параметрами їх експлуатації. Завдяки згладженому коефіцієнту зниження попиту модель уникає різких стрибків у поведінці цільової функції, що робить її більш стабільною для чисельної оптимізації та придатною для масштабування на мережевому рівні.

Фінальна MILP-постановка, яка отримується після генерації набору маршрутів, дозволяє одночасно обирати маршрути, визначати частоти курсування та розподіляти попит між ними з урахуванням пропускну здатності інфраструктури та обмежень щодо рухомого складу. Таким чином, модель забезпечує комплексний опис організації швидкісного пасажирського руху, поєднуючи геометрію мережі, поведінку пасажирського попиту та експлуатаційні рішення в єдиній формалізації.

Висновки.

Сформовано концепцію моделі організації швидкісного пасажирського руху на залізничній мережі в контексті парадигми цифрових двійників транспортних систем. На відміну від традиційних підходів до формування маршрутної мережі, запропонована модель одночасно визначає як топологію маршрутів, так і частоти їх курсування, що забезпечує узгодженість між обсягом попиту, пропускну здатністю інфраструктури та очікуваним економічним результатом. Включення частот у якості оптимізаційних змінних відповідає сучасним тенденціям у задачах Transit Network Design та дозволяє врахувати, яка частина попиту реально буде задоволена.

На основі цієї характеристики отримується коефіцієнт зниження попиту, який плавно модифікує вихідний обсяг пасажирів, враховуючи погіршення привабливості маршруту зі збільшенням кількості проміжних зупинок.

Особливістю моделі є використання плавного коефіцієнта зниження попиту залежно від щільності зупинок, що усуває недоліки кусково-визначених функцій попиту й забезпечує коректнішу поведінку при порівнянні маршрутів різної структури. Це дозволяє адекватно моделювати компроміс між швидкістю та охопленням пасажирського ринку.

Ще однією перевагою є формулювання задачі у вигляді MILP після попередньої генерації кандидатних маршрутів. Такий підхід робить практично здійсненою оптимізацію навіть на мережевому рівні, забезпечуючи відтвореність і можливість інтеграції з цифровим двійником для подальших сценарних досліджень.

Разом з тим, модель має низку обмежень. По-перше, використання добових пасажиропотоків не дозволяє врахувати пікові коливання попиту, що може впливати на точність оцінки необхідної частоти курсування. По-друге, генерація кандидатних маршрутів задає верхню межу на різноманітність конфігурацій мережі, а якість рішення залежить від повноти цього набору. По-третє, поточна постановка не враховує можливих технологічних обмежень, пов'язаних із перетинами потоків, конфліктами розкладу або особливостями швидкісних ділянок.

Перспективи подальших досліджень передбачають:

- включення часової динаміки попиту та використання прогностичних моделей для різних сценаріїв розвитку ринку;
- інтеграцію моделі з модулем імітаційного моделювання для автоматичного оновлення параметрів цифрового двійника;
- розширення набору обмежень та критеріїв з урахуванням розкладів, інтервалів, технічних регламентів та чутливості до зовнішніх чинників;
- застосування методів робастної оптимізації для роботи з невизначеними або неповними даними про попит.

Запропонована модель є вагомим кроком до створення інтелектуального інструменту підтримки рішень у проєктуванні мережі високошвидкісного руху, здатного адаптуватися до умов реального попиту й взаємодіяти з цифровим двійником транспортної системи.

1. Thompson, E. A., Lu, P., Alimo, P. K., Atuobi, H. B., Akoto, E. T., Abbew, C. K. Revolutionizing railway systems: A systematic review of digital twin technologies. *High-speed Railway*. 2025. 3(3), 238–250.
2. Ou, Y., Mihăiță, A.-S., Ellison, A., Mao, T., Lee, S., Chen, F. Rail Digital Twin and Deep Learning for Passenger Flow Prediction Using Mobile Data. *Electronics*. 2025. 14(12), 2359. <https://doi.org/10.3390/electronics14122359>.
formation of a rational high-speed train network in terms of both operational efficiency and passenger appeal.
3. Shi, X., Zhou, W., & Li, X. Optimization of Line Planning by Integrating Ticket Pricing and Seat Allocation Decisions for High-Speed Railway. *Mathematics*. 2025. 13(7), 1073. <https://doi.org/10.3390/math13071073>
4. Xu, R., Wang, F., Zhou, F. Train Stop Schedule Plan Optimization of High-Speed Railway Based on Time-Segmented Passenger Flow Demand. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Transportation Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1061/9780784482742.103>.
5. Yao, Z., Schöbel, A., Nie, L., Jäger, S. Benders Decomposition for Passenger-Oriented Train Timetabling with Hybrid Periodicity. *arXiv preprint*. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.09892>.
6. Bafandkar, S., Shafahi, Y., Eslami, A., Yazdiani, A. (). Digitalizing Railway Operations: An Optimization-Based Train Rescheduling Model for Urban and Interurban Disrupted Networks. *arXiv preprint*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.14671>.
7. Zhong, L., Liu, Y., Xu, G., Liu, W., Yang, H. Train capacity optimization under stochastic demand: A flexible composition strategy with extra-long trains. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2025. 204, 104430. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104430>.
8. Guihaire, V., Hao, J.-K. Transit network design and scheduling: A global review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2008. 42(10), 1251–1273. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.03.011>.

Prokhorov V.M., Parkhomenko L.O., Kalashnikova T.Yu., Slobodianiuk O.A. Development of a Transit Network Design Model for High-Speed Rail Passenger Transport within the Digital Twin Paradigm of Transportation Systems.

The article discusses the development of a Transit Network Design (TND) model for optimizing the routes of high-speed passenger trains on a railway network, considering the predicted demand for transportation between stations. Primary attention is given to the construction of a mathematical apparatus that allows for the generation of routes without a predefined list, utilizing only the network topology and the expected demand matrix. The proposed model moves beyond static planning by accounting not only for baseline demand values but also for a function modeling the decrease in travel attractiveness depending on the number of intermediate stops between the origin and destination stations. This approach allows for an objective evaluation of hypothetical routes and the

The model proposes an objective function aimed at maximizing the total realized demand or the revenue of the transport service operator. This approach enables the assessment of the influence of topological decisions (route configuration, stop placement, trip lengths) on the economic and operational efficiency of the system. The paper also thoroughly examines the potential application of the Digital Twin paradigm for the simulation-based reproduction of network functioning, which allows for the analysis of alternative schedules, topologies, and routing policies on a near-real-time scale. This provides a foundation for the subsequent automation of network formation and its reproducibility within a modern digital environment.

Keywords: route optimization, high-speed transport, Transit Network Design, passenger transport demand, Digital Twin, mathematical modeling, railway transport.

Прохоров Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>.

E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Пархоменко Лариса Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>.

E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.

Калашнікова Тетяна Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>.

E-mail: bulavina_ty@ukr.net.

Слободянюк Олена Анатоліївна, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0007-0085-8225>.

E-mail: elena14152629@gmail.com.

<https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>.

E-mail:

prokhorov@kart.edu.ua.

Prokhorov Viktor, Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD:

State University of Railway Transport. ORCID iD:

<https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>.

E-mail:

parhomenko@kart.edu.ua.

Parkhomenko Larysa, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian

Kalashnikova Tetiana, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD:

<https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>.

E-mail:

bulavina_tv@ukr.net.

Slobodianiuk Olena, master's student, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD:

<https://orcid.org/0009-0007-0085-8225>.

E-mail:

elena14152629@gmail.com.