

ЗМІЙ С. О., к.т.н., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів (Український державний університет залізничного транспорту),

КАЛАШНИК М. О., здобувачка 2 курсу, першого бакалаврського рівня, кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів (Український державний університет залізничного транспорту),

MELIKHOV Anatolii, Mipro OY, Tallinn, Estonia



Архітектура цифрової платформи мультимодальних пасажирських перевезень із подієвою інтеграцією залізничних даних і сервісів таксі

Анотація. У статті розглянуто науково-прикладні аспекти побудови цифрової платформи мультимодальних пасажирських перевезень, орієнтованої на інтеграцію залізничного транспорту і сервісу таксі в межах єдиного інформаційного середовища. Актуальність дослідження зумовлена потребою підвищення ефективності організації поїздок за схемою «від дверей до дверей», а також необхідністю забезпечення стійкості транспортної системи України в умовах воєнного стану та наслідків збройної агресії російської федерації. Визначено, що залізничний транспорт у мультимодальній системі виконує функцію магістрального регулярного сегмента, тоді як сервіс таксі забезпечує першу і останню милю та компенсує транспортні розриви, пов'язані зі зміною графіка руху поїздів. Метою статті є розроблення та наукове обґрунтування архітектури цифрової платформи мультимодальних перевезень з інтеграцією залізничних даних і сервісу таксі, визначення складу даних, необхідних для їхньої інформаційної взаємодії, а також формалізація послідовності обміну та обробки даних для організації мультимодальної поїздки. У роботі використано системний підхід, структурно-функціональний аналіз, метод архітектурної декомпозиції, а також елементи процесного та подієвого моделювання. У результаті дослідження визначено основні групи даних, які мають бути передані між залізничною підсистемою, сервісом таксі та цифровою платформою: довідкові, розкладні, геолокаційні, оперативні, подієві, транзакційні. Запропоновано архітектуру цифрової платформи, що включає рівень джерел даних, інтеграційний рівень, ядро мультимодальної оркестрації, прикладні сервіси і аналітичний контур. Розроблено механізм узгодження зміни часу руху поїзда із сегментом таксі у випадках непередбачуваних зупинок, затримок, зміни ЕТА та інших відхилень графіка. Для українських умов обґрунтовано доцільність інтеграції із сервісом таксі як інструмента адаптивного перепланування мультимодального маршруту. Наукова новизна роботи полягає в розробленні архітектурної моделі цифрової платформи, орієнтованої на подієву синхронізацію регулярного залізничного транспорту з гнучким сервісом таксі, а також у введенні показника надійності стикування мультимодальних сегментів для оцінювання стійкості маршруту. На відміну від відомих підходів, запропонована модель орієнтована не лише на маршрутний пошук, а на подієво-керовану оркестрацію мультимодальної поїздки з урахуванням динамічної зміни параметрів залізничного сегмента і адаптивного перепланування сервісу таксі. Практичне значення результатів полягає в можливості використання запропонованих рішень для створення цифрових платформ мультимодальної мобільності в Україні.

Ключові слова: мультимодальні перевезення, цифрова платформа, залізничний транспорт, таксі, МaaS, інформаційна взаємодія, архітектура системи, обмін даними, реальний час.

Вступ

Цифрова трансформація транспортної галузі формує нові підходи щодо організації пасажирських перевезень, у яких пріоритет надано не окремому виду транспорту, а цілісній мобільності користувача. У межах такого підходу мультимодальні перевезення розглядають як форму організації поїздки, за якої пасажир послідовно використовує декілька видів

транспорту, а цифрові сервіси забезпечують узгоджене планування, бронювання, оплату і супровід маршруту [1, 2]. Особливого значення набуває інтеграція регулярних видів транспорту, насамперед залізничного, із гнучкими сервісами виклику таксі, що забезпечують першу та останню милю. Попри активний розвиток цифрових сервісів мобільності, наявні рішення переважно зосереджені або на

© ЗМІЙ С. О., КАЛАШНИК М. О., MELIKHOV Anatolii, Mipro OY. 2026

ізолюваному плануванні залізничних перевезень, або на автономному функціонуванні сервісів виклику автомобіля. Натомість недостатньо опрацьованими залишаються питання побудови інформаційно-керуючої платформи, здатної в реальному часі узгоджувати параметри регулярного залізничного сегмента і гнучкого сервісу таксі в межах єдиного мультимодального маршруту. Особливо це стосується сценаріїв, у яких необхідне оперативне перепланування поїздки внаслідок затримок, зміни ЕТА або інших подій, що порушують початкові умови стикування сегментів.

Залізничний транспорт є одним із базових елементів пасажирської мобільності завдяки високій провізній спроможності, енергоефективності та можливості організації регулярного міжміського і приміського сполучення [1, 3]. Водночас сервіси виклику таксі забезпечують персоналізований і гнучкий доступ до транспортної мережі, допомагають компенсувати відсутність прямого громадського сполучення, скорочують непродуктивний час доїзду до вокзалів і створюють додаткові умови доступності для різних категорій пасажирів. За таких умов формування мультимодального маршруту за схемою «таксі – поїзд – таксі» є логічним напрямом розвитку сучасних транспортних сервісів.

Для України зазначена проблематика має особливу актуальність. Унаслідок повномасштабної збройної агресії російської федерації транспортна система функціонує в умовах значної невизначеності, інфраструктурних пошкоджень, зміни транспортних потоків, обмежень авіасполучення та потреби в забезпеченні безперервної мобільності населення. У таких умовах залізничний транспорт фактично став системоутворюючим видом міжрегіонального пасажирського сполучення. Проте ефективність його використання значною мірою залежить від якості стикування із сервісами підвезення та вивезення пасажирів, насамперед із сервісами таксі. Додатковою складністю є те, що графік руху поїздів може змінюватися через непередбачувані зупинки, затримки, безпекові обмеження, аварійно-відновлювальні роботи або перевантаження транспортних вузлів. За таких умов цифрова система має не лише відображувати актуальний стан поїздки, а і забезпечувати динамічне перепланування мультимодального маршруту. За таких умов на перший план виходить не лише сервісна, а й інформаційно-керуюча складова мультимодальної мобільності. Ідеться про побудову платформи, яка забезпечує збір, синхронізацію, інтерпретацію та подієве опрацювання залізничних, геолокаційних і замовних даних, а також підтримує автоматизоване ухвалення рішень про корегування параметрів поїздки.

Концепція *Mobility as a Service* передбачає інтеграцію різних видів транспорту в єдину цифрову екосистему, де користувач отримує доступ до всієї логіки поїздки через один інтерфейс [2]. Однак на практиці залізничні системи, сервіси таксі, геоінформаційні сервіси і платіжні модулі зазвичай функціонують у різних інформаційних контурах, що ускладнює побудову цілісної моделі маршруту. Отже, науково-прикладна проблема полягає в розробленні такої архітектури цифрової платформи мультимодальних перевезень, яка забезпечувала б не лише інтеграцію різнорідних джерел транспортних даних, а і подієво-керовану координацію мультимодальної поїздки в режимі реального часу. Розв'язання цієї проблеми потребує формалізації складу даних, визначення логіки міжсистемної взаємодії та побудови механізму адаптивного перепланування маршруту в разі відхилення залізничного сегмента від планових параметрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У науковій і прикладній літературі мультимодальні перевезення визначають як інтегровані транспортні процеси, у межах яких використано переваги різних видів транспорту для досягнення кращих показників часу, доступності, вартості, стійкості маршруту [1]. У пасажирському секторі мультимодальність розглядають у зв'язку з концепцією *Mobility as a Service*, яка передбачає об'єднання планування, бронювання та оплати різних транспортних послуг у межах єдиної цифрової платформи [2].

У європейській практиці побудови цифрових транспортних платформ значну увагу приділяють стандартизації даних. Зокрема, для опису транспортних мереж, маршрутів, розкладів і тарифів використовують Transmodel, NeTEx і GTFS, а для передавання інформації реального часу - SIRI і GTFS-Realtime [3, 4]. Використання таких стандартів забезпечує інтероперабельність між різними операторами та цифровими сервісами.

Разом із тим сервіси виклику таксі та on-demand мобільності тривалий час розвивалися за власними платформними моделями, що базовані переважно на закритих API і комерційних екосистемах. Це ускладнює їх повноцінну інтеграцію в мультимодальні платформи. Сучасні ініціативи зі стандартизації on-demand mobility свідчать про прагнення наблизити сервіси таксі до транспортних систем регулярного типу через формалізацію структури даних, тарифів, статусів замовлення та подій [5].

Архітектурні підходи щодо побудови MaaS-платформ тяжіють до мікросервісної моделі, де дані

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

надходять від багатьох різномірних джерел, а взаємодія між модулями забезпечена через API-шлюзи, брокери повідомлень і сервіси оркестрації [6]. Для транспортних сервісів особливого значення набуває подієво-орієнтована обробка, оскільки реальна транспортна ситуація є динамічною і потребує оперативної реакції на зміни у стані маршруту [4, 7].

Більшість наявних досліджень зосереджена або на загальних принципах МaaS-платформ, або на стандартизації транспортних даних без деталізації логіки міжсегментного узгодження в конкретних мультимодальних сценаріях. Недостатньо розкритими залишаються питання координації регулярного залізничного сегмента із сервісами on-demand мобільності в умовах часової невизначеності, а також формалізованого оцінювання стійкості стикування сегментів маршруту.

Окремі дослідження демонструють важливість урахування реального часу під час оцінювання доступності транспортної системи. Дані про затримки, скасування та варіативність часу в дорозі можуть істотно змінювати сприйняття якості транспортного сервісу [7]. Це особливо актуально для маршруту, що містить стикування між залізницею і таксі, де будь-яка затримка поїзда здатна вплинути на життєздатність усього мультимодального сценарію.

Попри наявність значного масиву праць, недостатньо опрацьованими залишаються формалізація складу даних для інтеграції залізничного транспорту і сервісів таксі; побудова архітектури цифрової платформи, орієнтованої на взаємодію регулярного та on-demand сегментів; алгоритмічне забезпечення узгодження змін графіка руху поїздів із параметрами таксомоторного обслуговування; а також адаптація мультимодальних платформ до умов підвищеної ризиковості транспортного середовища.

Отже, існує потреба в розробленні архітектурної моделі цифрової платформи мультимодальних перевезень, яка б поєднувала регулярність залізничного руху, гнучкість сервісів таксі та подієво-керовані механізми реагування на відхилення.

Визначення мети та завдання дослідження.

Метою статті є розроблення та обґрунтування архітектури цифрової платформи мультимодальних перевезень із інтеграцією залізничних даних і сервісів таксі, визначення складу даних, необхідних для їхньої інформаційної взаємодії, а також формалізація послідовності обміну та обробки даних для організації мультимодальної поїздки.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі завдання:

- 1) проаналізовано особливості взаємодії залізничного транспорту і сервісів виклику таксі в межах мультимодальної пасажирської поїздки;
- 2) визначено склад даних, необхідних для інформаційної взаємодії між залізничною підсистемою, сервісами таксі та цифровою платформою;
- 3) розроблено структурно-функціональну модель цифрової платформи мультимодальних перевезень;
- 4) сформовано структурну схему системи;
- 5) визначено послідовність обміну та обробки даних для сценаріїв мультимодальної поїздки за участю залізничного транспорту і таксі;
- 6) розроблено механізм узгодження зміни часу руху поїзда з параметрами сегмента таксі в умовах непередбачуваних зупинок, затримок і відхилень від графіка.

Методологія дослідження

Методологічною основою дослідження є системний підхід щодо розгляду мультимодальної поїздки як складної соціотехнічної системи, у межах якої взаємодіють транспортні оператори, цифрова платформа, користувачі, сервіси виклику таксі, платіжні та геоінформаційні сервіси. Застосування системного підходу дало змогу розглядати мультимодальну поїздку не як сукупність ізольованих транспортних операцій, а як цілісний процес із часовою, просторовою та інформаційною узгодженістю.

У дослідженні використано структурно-функціональний аналіз, що дав змогу виділити базові підсистеми цифрової платформи, визначити їхні функції і встановити характер інформаційних зв'язків між ними. Це допомогло перейти від описового рівня до побудови формальної архітектурної моделі цифрової платформи мультимодальних перевезень.

Для опису динаміки мультимодальної поїздки застосовано процесне моделювання, за допомогою якого формалізовано етапи ініціації маршруту, отримання даних, побудови маршрутних альтернатив, бронювання, супроводу в реальному часі, перепланування та завершення поїздки. Доповнення процесного підходу подієвим моделюванням дало змогу формалізувати реакцію системи на затримки поїздів, непередбачувані зупинки, зміну ЕТА, затримку подавання таксі та інші події, критичні для стійкості мультимодального маршруту.

Також використано метод архітектурної декомпозиції, за яким можна подати платформу як багаторівневу структуру, що охоплює зовнішні джерела даних, інтеграційний рівень, ядро оркестрації, прикладні сервіси та аналітичний контур.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Така декомпозиція забезпечує можливість логічного та функціонального розмежування компонентів системи, що є важливим для подальшої практичної реалізації.

Для оцінювання стійкості пересадки між залізничним і таксомоторним сегментами використано елементи формалізації часових залежностей, у межах яких введено коефіцієнт надійності стикування мультимодальних сегментів. Його застосування дає змогу перейти від якісного оцінювання ризику зриву маршруту до формалізованого критерію запуску механізму перепланування.

Отже, використана сукупність методів є адекватною поставленій меті дослідження та забезпечує необхідний науковий рівень обґрунтування запропонованої архітектури цифрової платформи мультимодальних перевезень.

Водночас дослідження має певні обмеження. Запропонована архітектурна модель має концептуально-прикладний характер і не передбачає повномасштабної програмної реалізації в межах цієї роботи. Уведені показники та логіка перепланування потребують подальшої експериментальної верифікації на реальних або наближених до реальних наборах транспортних даних.

Виклад основного матеріалу.

Аналіз взаємодії залізничного транспорту і сервісів виклику таксі

Залізничний транспорт і сервіси виклику таксі мають різну організаційну та інформаційну природу. Залізнична система функціонує за нормативним розкладом і має високий ступінь регламентованості, тоді як таксі-сервіс є динамічним, попитузалежним і орієнтованим на індивідуалізоване обслуговування. Їхня інтеграція можлива лише за умови узгодження часових, просторових і подієвих параметрів.

У межах мультимодальної поїздки таксі може виконувати роль підвезення пасажирів до залізничної станції, вивезення зі станції після прибуття поїзда або обидві функції одночасно. Це дає змогу розглядати зв'язок «залізниця + таксі» як один із найбільш практичних сценаріїв реалізації door-to-door мобільності. Для такого сценарію основними є точність визначення часу прибуття пасажирів до станції, коректний розрахунок резерву пересадки, наявність даних реального часу про стан поїзда, доступність автомобіля таксі в потрібній локації та можливість оперативної зміни часу подавання. Загальну логіку інформаційної взаємодії між основними учасниками мультимодальної поїздки наведено на рис. 1.

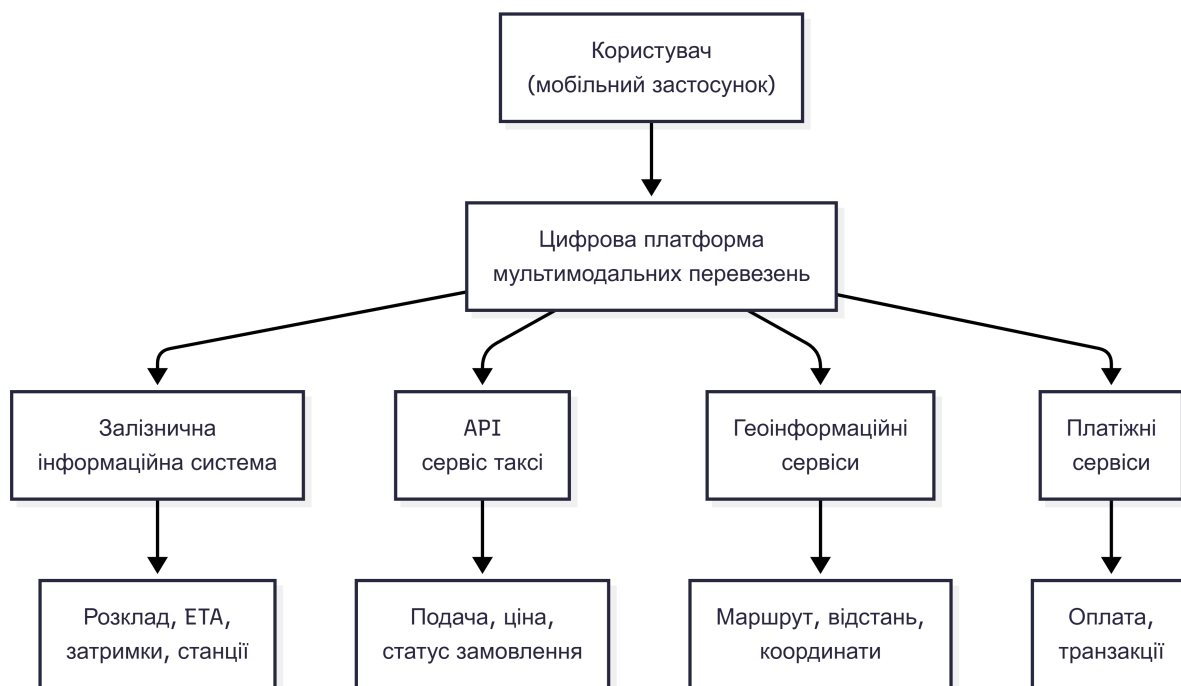


Рис. 1. Контекстна схема інформаційної взаємодії між користувачем, цифровою платформою, залізничною системою та сервісом таксі

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

У реальних умовах інформаційна взаємодія між цими двома сегментами може бути реалізована як через попереднє планування, так і через супровід поїздки в реальному часі. Перший випадок передбачає побудову та бронювання маршруту на основі планового розкладу і прогнозованих параметрів таксі, другий – постійне оновлення параметрів маршруту відповідно до поточного стану транспортної системи.

Для України така взаємодія має посилене значення через структурну роль залізниці в умовах війни. Після початку повномасштабної агресії російської федерації залізничний транспорт став критично важливим засобом евакуації, внутрішньої мобільності, гуманітарного та міжнародного сполучення. Це призвело до зростання навантаження на вокзали, зміни графіків, збільшення кількості нестандартних операційних ситуацій. У таких умовах сервіси таксі можуть бути механізмом локального транспортного балансування, особливо у великих містах і навколо основних залізничних вузлів [8].

Отже, взаємодію залізниці і таксі потрібно розглядати не як допоміжний сервісний елемент, а як окрему предметну сферу цифрової інтеграції, що потребує спеціалізованої архітектури платформи.

Склад даних, необхідних для інформаційної взаємодії

Ефективність інформаційної взаємодії між залізничним транспортом і сервісами таксі залежить від повноти, своєчасності та узгодженості обмінюваних даних. Для побудови цифрової платформи доцільно виокремити кілька груп даних (таблиця).

Основні групи даних цифрової платформи мультимодальних перевезень

Група даних	Джерело	Частота оновлення	Призначення
Довідкові залізничні дані	залізнична ІС	періодично	опис станцій, рейсів, платформ
Розкладні дані	залізнична ІС	за розкладом / у разі зміни	планування маршруту
Дані реального часу	залізнична ІС	подієво / у реальному часі	супровід і перепланування
Дані доступності таксі	API сервісу таксі	у реальному часі	оцінювання варіантів першої/останньої милі
Дані замовлення таксі	API сервісу таксі	подієво	супровід таксі-сегмента
Геодані	картографічні сервіси	у реальному часі / періодично	оцінювання часу доїзду та переміщення
Дані платформи	внутрішнє ядро	безперервно	оркестрація, журналювання, аналітика

Дані залізничної підсистеми

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

До складу залізничних даних належать довідкові дані, планові дані, дані реального часу та дані квиткового контексту.

До довідкових даних належать ідентифікатор поїзда, номер рейсу, категорія поїзда, ідентифікатор станції, назва станції, координати станції, опис зони посадки/висадки та інформація про платформу.

До планових даних належать запланований час відправлення, запланований час прибуття, послідовність станцій, нормативна тривалість стоянки, нормативний час пересадки та маршрут рейсу.

До даних реального часу належать фактичний час відправлення, фактичний час прибуття, поточна затримка, прогнозований час прибуття (ETA), повідомлення про непередбачувану зупинку, зміна колії або платформи, скасування або скорочення маршруту.

До даних квиткового контексту належать стан бронювання, наявність місць, статус квитка, клас обслуговування та особливі умови перевезення.

Дані сервісу виклику таксі

Для сервісу таксі, необхідні такі дані: доступності сервісу, поїздки, замовлення та подієві.

До даних доступності сервісу належать наявність автомобілів у зоні, середній час подавання, кількість доступних автомобілів, категорії автомобілів, доступність спеціалізованих автомобілів.

До даних поїздки належать точка посадки, точка висадки, орієнтовний час подавання, орієнтовний час у дорозі, вартість поїздки та рекомендований маршрут.

До даних замовлення належать ідентифікатор замовлення, статус замовлення, призначений водій, автомобіль, час прибуття водія, статус виконання замовлення та спосіб оплати.

До подієвих даних належать підтвердження замовлення, затримка подавання, перепризначення водія, скасування поїздки та завершення поїздки.

Дані цифрової платформи

Цифрова платформа формує власну інтегровану модель даних: ідентифікатор мультимодальної поїздки, модель маршруту,

конфігурація сегментів, часові резерви між сегментами, статус усієї поїздки, журнал подій, правила перепланування, узагальнений тариф, індекс надійності маршруту.

Отже, інформаційна взаємодія між залізничною і таксомоторною підсистемами має бути базована на багатокomпонентній інформаційній моделі, яка поєднує структурні, часові, геопросторові, транзакційні та подієві дані. Це дає змогу перейти від звичайної інтеграції довідкових сервісів до побудови платформи, яка здатна управляти мультимодальним маршрутом як цілісним цифровим об'єктом.

Архітектура цифрової платформи мультимодальних перевезень

Розроблення архітектури цифрової платформи має ґрунтуватися на таких принципах: модульність, масштабованість, API-орієнтованість, подієва синхронізація, відмовостійкість, підтримка реального часу та безпечне управління доступом.

Запропонована платформа складається з п'яти рівнів: джерел даних, інтеграційного, ядра мультимодальної оркестрації, прикладного і аналітичного. Запропонована архітектура допомагає локалізувати залежності від зовнішніх API, масштабувати високонавантажені сервіси незалежно, підтримувати подієве реагування, зберігати історію змін для аналітичної обробки та реалізовувати адаптивне перепланування без повної перебудови системи. На відміну від традиційних маршрутних сервісів, у яких інтеграція транспортних сегментів має переважно інформаційно-довідковий характер, запропонована архітектура орієнтована на керування повним життєвим циклом мультимодальної поїздки. Це передбачає не лише побудову маршруту, а і синхронізацію сегментів, подієве реагування на відхилення, повторне узгодження часових параметрів і накопичення історичних даних для подальшої аналітики.

Структурна схема системи цифрової платформи мультимодальних перевезень (рис. 2) відображає основні функціональні компоненти, інформаційні потоки та логіку взаємодії між зовнішніми джерелами даних і внутрішніми модулями платформи. На відміну від загальної архітектурної моделі, структурна схема деталізує прикладний склад системи і демонструє, через які підсистеми реалізована побудова, супровід, корегування та завершення мультимодальної поїздки.

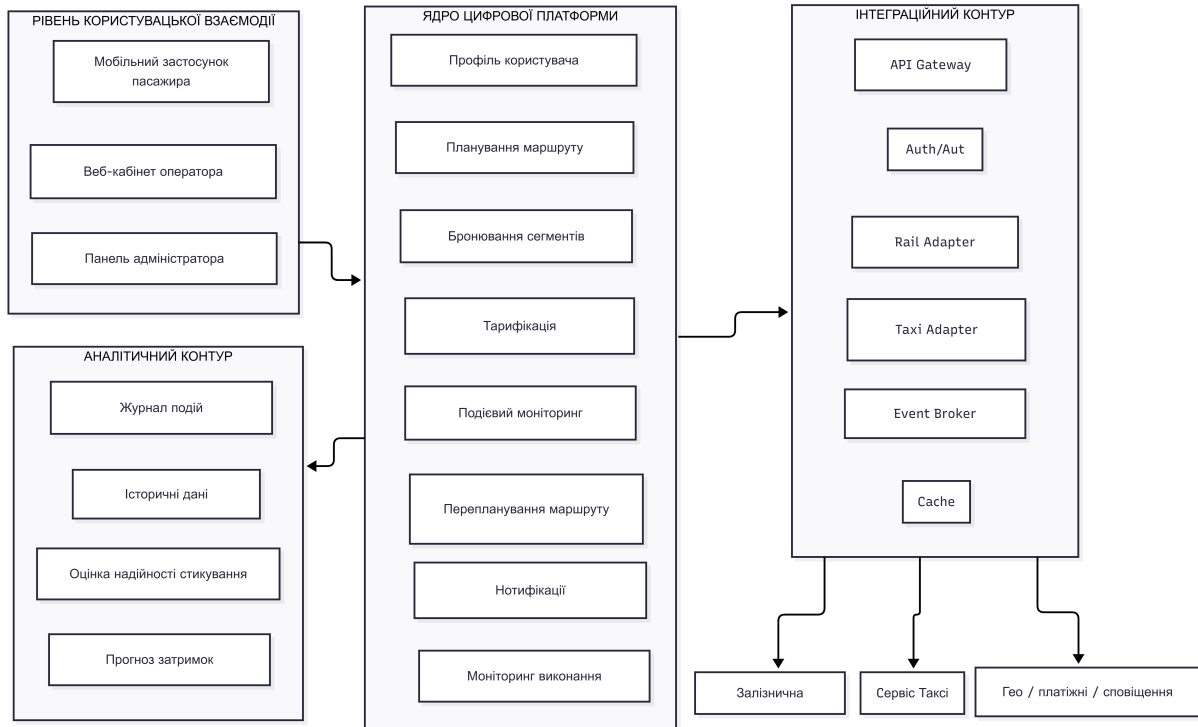


Рис. 2. Структурна схема системи цифрової платформи мультимодальних перевезень з інтеграцією залізничних даних і сервісу таксі

На рівні інтеграційного контуру реалізовано функції API Gateway, автентифікації та авторизації, адаптації залізничних даних, інтеграції із сервісом таксі, брокеризації подій і кешування оперативної інформації. Саме цей рівень забезпечує семантичне і технічне узгодження між різнорідними зовнішніми джерелами даних і внутрішніми модулями цифрової платформи.

Аналітичний контур системи призначений для накопичення історичних даних, журналювання подій, оцінювання надійності стикування та прогнозування затримок. Його наявність підвищує не лише операційну ефективність платформи, а і наукову значущість запропонованої моделі, оскільки дає змогу перейти від простого реагування на події до побудови предиктивних механізмів управління мультимодальними маршрутами.

Механізм узгодження зміни часу руху поїзда та інтеграція з таксі

Однією з головних особливостей запропонованої платформи є підтримка динамічного перепланування в разі зміни часу руху поїзда. Це особливо важливо для України, де внаслідок війни та пов'язаних із нею ризиків відхилення від графіка можуть бути спричинені як технологічними, так і безпековими факторами.

Після надходження події про відхилення від залізничної системи платформа має оновити ETA і

статус сегмента RailSegment, перерахувати часовий резерв між сегментами, оцінити ризик зриву пересадки та, якщо резерв стає критичним, ініціювати зміну параметрів TaxiSegment через Таксі Adapter. Схему узгодження зміни часу руху поїзда із замовленням таксі наведено на рис. 3.

Для формалізації моменту переходу від звичайного супроводу маршруту до режиму корегування доцільно використовувати коефіцієнт надійності стикування мультимодальних сегментів, який урахує наявний резерв часу, варіативність прибуття поїзда, час переміщення пасажирів в межах станції та варіативність подавання таксі.

$$K_{st} = \frac{T_{res}}{T_{rail_var} + T_{walk} + T_{taxi_var}}$$

де T_{res} – наявний резерв часу між сегментами;

T_{rail_var} – оцінена варіативність часу прибуття поїзда;

T_{walk} – час переміщення пасажирів від платформи до точки посадки в таксі;

T_{taxi_var} – варіативність часу подавання таксі.

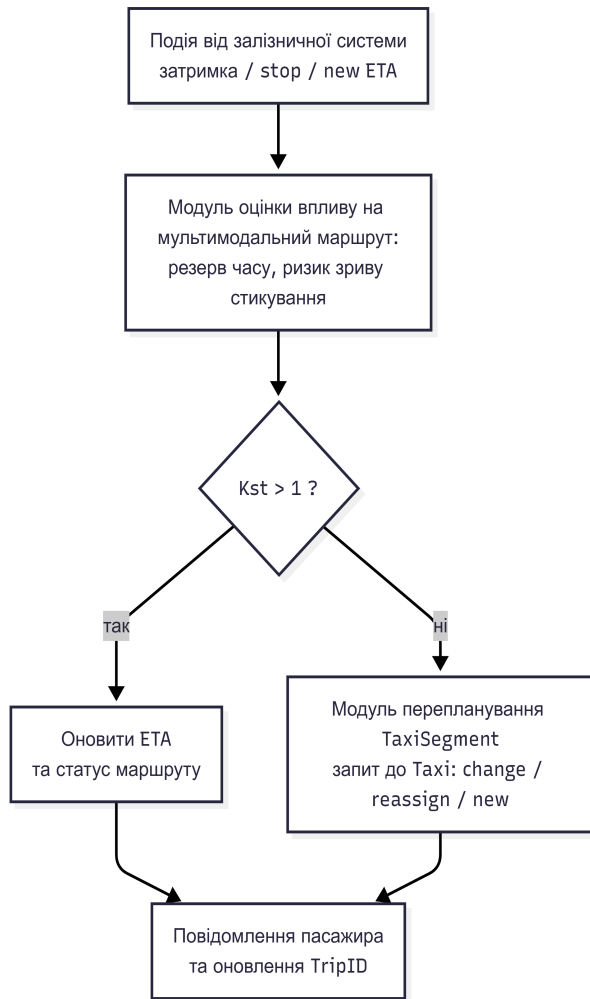


Рис. 3. Схема узгодження зміни часу руху поїзда із замовленням таксі в межах мультимодальної поїздки

Якщо $K_{st} > 1$, маршрут вважають стійким; якщо $K_{st} \leq 1$, необхідне перепланування.

Механізм узгодження починає діяти після надходження від залізничної системи події про затримку, зміну ETA, непередбачувану зупинку або інше порушення графіка. Для формалізації впливу відхилення від графіка на мультимодальний маршрут доцільно використовувати показник часової зміни залізничного сегмента

$$\Delta T_{rail} = T_{fact} - T_{plan},$$

де ΔT_{rail} – відхилення фактичного часу руху поїзда від планового;

T_{fact} – фактичний або оновлений прогнозований час прибуття;

T_{plan} – плановий час прибуття поїзда згідно з початковим розкладом.

Якщо $\Delta T_{rail} > 0$, поїзд прибуває із запізненням, що безпосередньо впливає на параметри наступного сегмента маршруту.

Отримана подія надходить до модуля оцінювання впливу на мультимодальний маршрут, де відбувається повторний аналіз часових параметрів пересадки. На цьому етапі система визначає, чи зберігається достатній резерв часу між прибуттям поїзда і запланованим сегментом таксі.

Резерв часу стикування між залізничним і таксомоторним сегментами може бути поданий як

$$T_{res} = T_{taxi}^{dep} - T_{rail}^{arr} - T_{move}$$

де T_{res} – резерв часу стикування;

T_{taxi}^{dep} – запланований час початку таксі-сегмента;

T_{rail}^{arr} – фактичний або прогнозований час прибуття поїзда;

T_{move} – час переміщення пасажирів від платформи до точки посадки в таксі.

Додатне значення T_{res} свідчить про наявність допустимого резерву, тоді як його зменшення вказує на зростання ризику зриву пересадки.

Якщо зміна часу руху поїзда не порушує допустимих меж стикування, система лише оновлює часові параметри маршруту та інформує користувача про зміну ETA. Якщо ж резерв стикування зменшується до критичного рівня, цифрова платформа ініціює процедуру корегування сегмента таксі. У межах інтеграції із сервісом таксі це може передбачати зміну часу подавання автомобіля, повторне підтвердження замовлення, перепризначення транспортного засобу або створення нового таксі-сегмента.

Сервіс таксі інтегрований у платформу не лише як джерело даних про доступність автомобілів і вартість поїздки, а як повноцінний учасник процесу динамічного перепланування мультимодального маршруту. Це допомагає узгоджувати регулярний залізничний сегмент із гнучким on-demand сервісом і підтримувати цілісність поїздки навіть за умов відхилення від початкового графіка.

Отже, механізм узгодження зміни часу руху поїзда та інтеграція з сервісом таксі забезпечують

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

адаптивність цифрової платформи мультимодальних перевезень. Саме цей механізм перетворює платформу з інструмента статичного планування на систему подієво-керованого управління поїздкою, здатну підтримувати стабільність мультимодального маршруту в умовах динамічної транспортної ситуації.

Послідовність обміну та обробки даних

Організація мультимодальної поїздки передбачає наскрізну послідовність інформаційних

взаємодій. Користувач задає параметри маршруту, платформа отримує дані від залізничної системи і таксі, будує маршрутні альтернативи, бронює, супроводжує поїздку в реальному часі та реагує на відхилення.

Послідовність обміну та обробки даних для організації мультимодальної поїздки наведено на рис. 4.

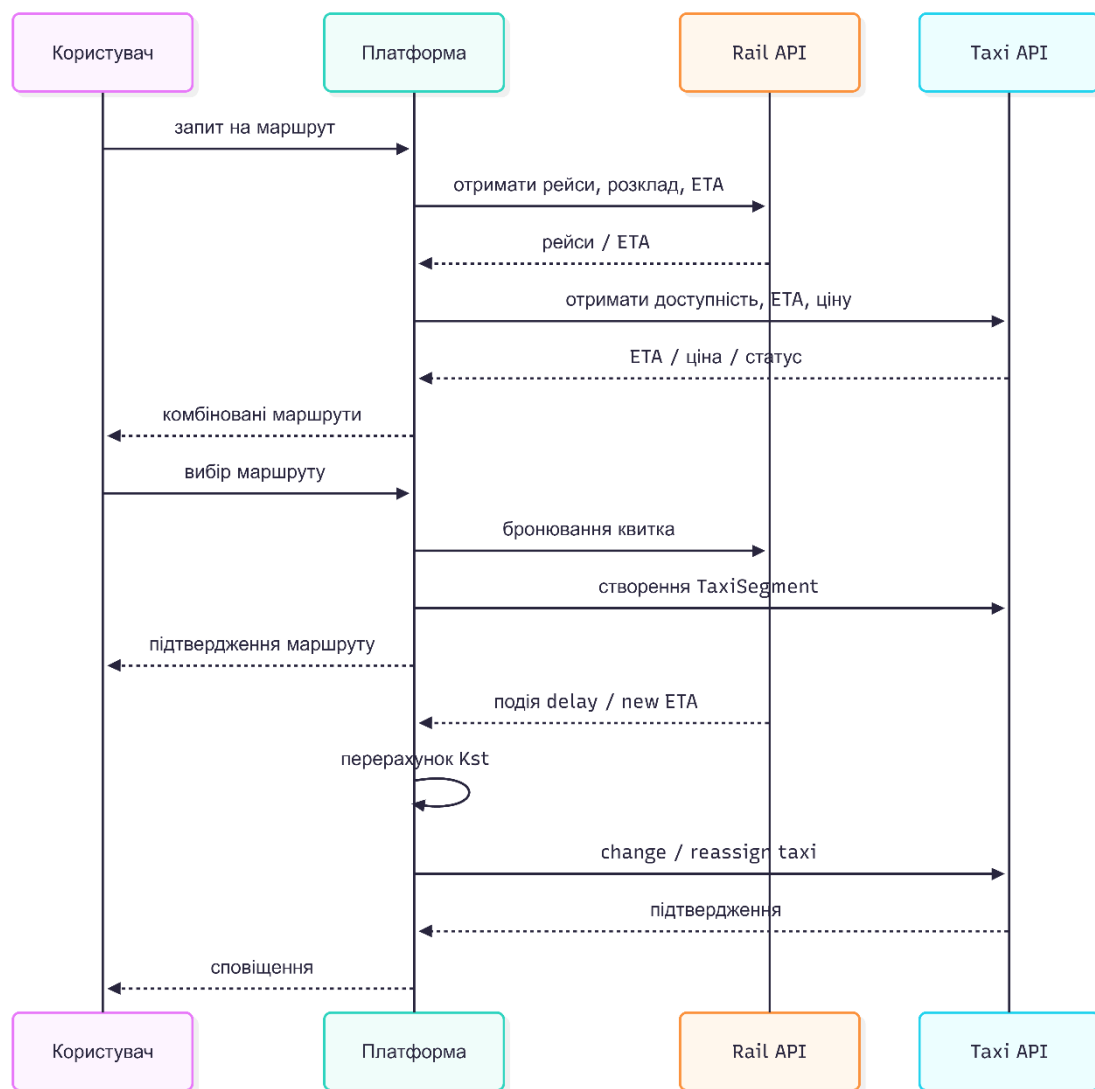


Рис. 4. Послідовність обміну даними для мультимодальної поїздки

«таксі – поїзд – таксі»

Послідовність обміну та обробки даних у цифровій платформі мультимодальних перевезень має забезпечувати безперервну інформаційну підтримку поїздки на всіх етапах її реалізації: від формування запиту до завершення маршруту. На відміну від

звичайних сервісів пошуку шляху, у цьому випадку платформа виконує функції координації транспортних сегментів, синхронізації часу пересадки, супроводу поїздки в реальному часі та адаптивного реагування на відхилення. У межах дослідження доцільно

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

виділити щонайменше три базові сценарії функціонування платформи: штатний сценарій планування поїздки; сценарій супроводу маршруту без критичних відхилень; сценарій подієвого переplanування в разі порушення параметрів стикування між сегментами. Таке виділення сценаріїв дає змогу чіткіше пов'язати архітектурні рішення з конкретними режимами функціонування системи.

На початковому етапі користувач через мобільний застосунок або вебінтерфейс задає основні параметри поїздки: початкову і кінцеву точки маршруту, бажаний час відправлення або прибуття, а також додаткові вимоги щодо вартості, доступності чи допустимого часу пересадки. Отриманий запит надходить до цифрової платформи, де його перевіряють, нормалізують адресу і формують внутрішню модель запиту.

Після цього платформа одночасно звертається до зовнішніх джерел даних. Із залізничної інформаційної системи отримують відомості про доступні поїзди, розклад руху, прогнозований час прибуття і відправлення, поточні затримки, станції та інші параметри залізничного сегмента. Через адаптер сервісу таксі надходять дані про доступність автомобілів, орієнтовний час подавання, вартість таксі-сегмента і прогнозований час поїздки. Додатково можуть бути залучені геоінформаційні сервіси для уточнення координат, відстаней і дорожньої ситуації.

На основі зібраних даних ядро мультимодальної оркестрації формує можливі маршрутні альтернативи за сценаріями «таксі – поїзд», «поїзд – таксі» або «таксі – поїзд – таксі». Для кожного варіанта розраховують сумарний час поїздки, вартість, часовий резерв пересадки, очікуваний рівень надійності, відповідність вимогам користувача. Після ранжування маршрутів користувачу пропонують найбільш доцільний набір альтернатив.

Для інтегрального оцінювання альтернативних маршрутів може бути використана узагальнена функція

$$Q = \alpha T_{mm} + \beta C_{mm} + \gamma N_{tr} + \delta \frac{1}{K_{st}}$$

де Q – інтегральна оцінка маршруту;

T_{mm} – загальний час поїздки;

C_{mm} – загальна вартість маршруту;

N_{tr} – кількість пересадок;

K_{st} – коефіцієнт надійності стикування;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – вагові коефіцієнти відповідних критеріїв.

Мінімізація значення Q дає змогу вибрати найбільш доцільний маршрут з урахуванням часу, вартості, кількості пересадок і стійкості стикування. Запропонована функція не претендує на універсальність, однак може бути використана як базовий критерій ранжування мультимодальних альтернатив у цифровій платформі. Значення вагових коефіцієнтів можна визначати залежно від пріоритетів користувача або політики сервісу.

Після вибору маршруту система переходить до етапу бронювання. Платформа надсилає запит до залізничної системи для підтвердження квитка або місця, а також формує замовлення в сервісі Таксі для відповідного сегмента поїздки. Після успішного підтвердження обидва транспортні сегменти об'єднуються в межах єдиного запису мультимодальної поїздки з присвоєнням індивідуального ідентифікатора. На цьому етапі користувач отримує підтвердження маршруту і основні параметри подальшого руху.

Після початку реалізації поїздки цифрова платформа переходить у режим супроводу в реальному часі. Вона відстежує статус замовлення таксі, оновлення даних про рух поїзда, фактичний і прогнозований час прибуття, а також подієві повідомлення про можливі відхилення. У цей період система безперервно оцінює, чи зберігається допустимий резерв стикування між сегментами маршруту.

У разі виникнення відхилення, зокрема затримки поїзда, непередбачуваної зупинки, зміни ЕТА або затримки подавання таксі, запускається механізм переplanування. Платформа виконує повторний розрахунок часових параметрів маршруту, оцінює ризик зриву пересадки та за потреби надсилає до сервісу таксі запит на зміну часу подавання, перепризначення автомобіля або формування нового таксі-сегмента. Одночасно користувач отримує повідомлення про зміну статусу маршруту і оновлені параметри подальшої поїздки.

Після завершення останнього транспортного сегмента система фіксує фактичний час виконання маршруту, статус усіх його складових і параметри відхилення від початкового плану. Ці дані передають до аналітичного контуру платформи, де використовують для оцінювання надійності маршруту, удосконалення правил переplanування та накопичення статистики для подальшого розвитку системи.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Отже, послідовність обміну та обробки даних у цифровій платформі мультимодальних перевезень має циклічний і подієво-керований характер. Її особливістю є те, що обмін даними не обмежений стадією пошуку маршруту, а триває протягом усього життєвого циклу поїздки, забезпечуючи узгодження регулярного залізничного сегмента з гнучким сервісом таксі та підтримуючи стійкість мультимодального маршруту в умовах динамічних змін транспортної ситуації.

Обговорення результатів

Запропонована архітектура цифрової платформи відрізняється від типових маршрутних сервісів тим, що вона орієнтована не лише на пошук маршруту, а на повноцінну оркестрацію мультимодальної поїздки. Це означає підтримку логіки стикування, управління подіями, перепланування і аналітики після завершення маршруту. Порівняно з традиційними сервісами пошуку маршруту, у яких результатом є переважно статичний набір транспортних альтернатив, запропонована модель передбачає безперервний цикл супроводу поїздки з можливістю втручання в параметри окремих сегментів. Саме це забезпечує вищу адаптивність системи в умовах варіативності часу руху, що є критично важливим для українського транспортного середовища.

Наукова значущість запропонованого підходу полягає в поєднанні трьох компонентів: формалізації складу даних для взаємодії залізничної й таксі, розроблення архітектурної моделі платформи та введення критерію надійності стикування, який може бути використаний для автоматизованого ухвалення рішень. Водночас запропонований підхід має і певні обмеження. Зокрема, практична реалізація такої платформи залежить від доступності зовнішніх API, повноти даних реального часу, готовності перевізників до стандартизованого обміну даними та можливості інтеграції із сервісами on-demand мобільності. Крім того, введений коефіцієнт надійності стикування потребує подальшої емпіричної верифікації на реальних наборах даних.

Практична значущість полягає в можливості застосування цих рішень для цифрових платформ України, зокрема в умовах підвищеної нестабільності транспортного середовища, спричиненої війною. У таких умовах важливою є здатність системи адаптуватися до непередбачуваних зупинок, затримок і змін маршрутів. Інтеграція з таксі як національним сервісом таксі підвищує прикладну релевантність запропонованої моделі.

Висновки

У статті запропоновано та обґрунтовано архітектуру цифрової платформи мультимодальних

пасажирських перевезень з інтеграцією залізничних даних і сервісів таксі для умов динамічної зміни параметрів транспортного середовища.

За результатами проведеного дослідження отримано такі основні результати:

- встановлено, що інтеграція залізничного транспорту і сервісів виклику таксі є головною умовою забезпечення мультимодальної поїздки за схемою «від дверей до дверей»;
- визначено склад даних, необхідних для інформаційної взаємодії між залізничною підсистемою, сервісами таксі та цифровою платформою;
- розроблено архітектуру цифрової платформи мультимодальних перевезень;
- сформовано структурну схему системи, яка деталізує функціональні модулі цифрової платформи та інформаційні зв'язки між користувацьким рівнем, інтеграційним контуром, зовнішніми транспортними сервісами та аналітичним середовищем;
- визначено послідовність обміну та обробки даних для організації мультимодальної поїздки;
- запропоновано механізм узгодження зміни часу руху поїзда із сегментом таксі;
- введено коефіцієнт надійності стикування мультимодальних сегментів;
- показано, що в умовах України цифрові платформи мультимодальних перевезень повинні мати подієво-керований, адаптивний і відмовостійкий характер.

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з математичним моделюванням ризиків зриву пересадки, побудовою прогностичних моделей затримок на основі історичних даних, а також розробленням цифрових двійників мультимодальних транспортних вузлів. Практичне впровадження запропонованих рішень доцільне у вигляді модульної цифрової платформи або надбудови над існуючими сервісами планування поїздок. Насамперед це стосується транспортних вузлів із високою роллю залізничного сполучення та значним попитом на сервіси першої й останньої милі.

Список використаних джерел

1. IRU. Multimodal transport: what it is and why it matters. URL: <https://www.iru.org/what-we-do/facilitating-trade-and-transit/different-types-freight-transport/multimodal-transport-what-it>
2. Urbanism Next. Mobility as a Service. URL: <https://www.urbanismnext.org/technologies/mobility-as-a-service>
3. MIA Platform. Multimodal transport and data standards: NeTEx, GTFS and more. URL: <https://mia-platform.eu/blog/multimodal-transport-netex-gtfs-data-standards/>
4. Pysae. Integrate GTFS Realtime and SIRI with bus fleet hardware.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- URL: <https://www.pysae.com/content/article/integrate-gtfs-realtime-siri-bus-fleet-hardware>
5. MobilityData. Open standards for mobility data. URL: <https://mobilitydata.org/>
6. Open Data Hub. Architecture reference for scalable service platforms. URL: <https://opendatahub-io.github.io/models-as-a-service/0.0.1/architecture/>
7. ScienceDirect. Transit accessibility and real-time reliability assessment. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214367X25000729>
8. Vovk, Y., Vovk, I., Plekan, U., Tson, O., & Oleksyuk, V. (2025). Sustainable and smart logistics centers: Challenges and opportunities for Ukraine's transport system. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 10(1), 116–124. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2025.10-1.8>
9. European Commission. Multimodal journey planner and EU transport data approaches. URL: https://transport.ec.europa.eu/document/download/76975a24-dd2a-4a0f-8f6f-35560822e1c7_en?filename=2011_09-multimodal-journey-planner.pdf
10. European Urban Mobility Observatory. Transforming suburban rail: RER-type systems. URL: https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/transforming-suburban-rail-case-study-rer-type-systems-european-metropolitan-areas_en
11. Transit App Resources. Ridehail and taxi integration perspectives. URL: <https://resources.transitapp.com/article/403-ridehail-and-taxi>
12. European Commission. Ukraine in motion: inclusive paths ahead. URL: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/ukraine-motion-inclusive-paths-ahead-2025-09-12_en
13. Pshinko, O., Charkina, T., Martseniuk, L., Orlovskaya, O. HUBs as a key tool for improving the quality of the service and development of multimodal passenger traffic. *Transport problems*. 2022. Vol. 17, Iss. 1. P. 201-214. <http://dx.doi.org/10.20858/tp.2022.17.1.17>
14. Naumov, V., Nagornyi, I., & Litvinova, Y. (2015). Model of multimodal transport node functioning. *Archives of Transport*, 36(4), 43–54. <https://doi.org/10.5604/08669546.1185202>
2. Urbanism Next. (n.d.). Mobility as a service. <https://www.urbanismnext.org/technologies/mobility-as-a-service> [in English]
3. MIA Platform. (n.d.). Multimodal transport and data standards: NeTEx, GTFS and more. <https://mia-platform.eu/blog/multimodal-transport-netex-gtfs-data-standards/> [in English]
4. Pysae. (n.d.). Integrate GTFS Realtime and SIRI with bus fleet hardware. <https://www.pysae.com/content/article/integrate-gtfs-realtime-siri-bus-fleet-hardware> [in English]
5. MobilityData. (n.d.). Open standards for mobility data. <https://mobilitydata.org/> [in English]
6. Open Data Hub. (n.d.). Architecture reference for scalable service platforms. <https://opendatahub-io.github.io/models-as-a-service/0.0.1/architecture/> [in English]
7. ScienceDirect. (n.d.). Transit accessibility and real-time reliability assessment. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214367X25000729> [in English]
8. Vovk, Y., Vovk, I., Plekan, U., Tson, O., & Oleksyuk, V. (2025). Sustainable and smart logistics centers: Challenges and opportunities for Ukraine's transport system. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 10(1), 116–124. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2025.10-1.8> [in English]
9. European Commission. (n.d.). Multimodal journey planner and EU transport data approaches. https://transport.ec.europa.eu/document/download/76975a24-dd2a-4a0f-8f6f-35560822e1c7_en?filename=2011_09-multimodal-journey-planner.pdf [in English]
10. European Urban Mobility Observatory. (n.d.). Transforming suburban rail: RER-type systems. https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/transforming-suburban-rail-case-study-rer-type-systems-european-metropolitan-areas_en [in English]
11. Transit App Resources. (n.d.). Ridehail and taxi integration perspectives. <https://resources.transitapp.com/article/403-ridehail-and-taxi> [in English]
12. European Commission. (2025, September 12). Ukraine in motion: Inclusive paths ahead. https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/ukraine-motion-inclusive-paths-ahead-2025-09-12_en [in English]
13. Pshinko, O., Charkina, T., Martseniuk, L., & Orlovskaya, O. (2022). HUBs as a key tool for improving the quality of the service and development of multimodal passenger traffic. *Transport Problems*, 17(1), 201–214. <https://doi.org/10.20858/tp.2022.17.1.17> [in English]
14. Naumov, V., Nagornyi, I., & Litvinova, Y. (2015). Model of multimodal transport node functioning. *Archives of Transport*, 36(4), 43–54.

References

1. IRU. (n.d.). Multimodal transport: What it is and why it matters. <https://www.iru.org/what-we-do/facilitating-trade-and-transit/different-types-freight-transport/multimodal-transport-what-it> [in English]
2. Urbanism Next. (n.d.). Mobility as a service. <https://www.urbanismnext.org/technologies/mobility-as-a-service> [in English]
3. MIA Platform. (n.d.). Multimodal transport and data standards: NeTEx, GTFS and more. <https://mia-platform.eu/blog/multimodal-transport-netex-gtfs-data-standards/> [in English]
4. Pysae. (n.d.). Integrate GTFS Realtime and SIRI with bus fleet hardware. <https://www.pysae.com/content/article/integrate-gtfs-realtime-siri-bus-fleet-hardware> [in English]
5. MobilityData. (n.d.). Open standards for mobility data. <https://mobilitydata.org/> [in English]
6. Open Data Hub. (n.d.). Architecture reference for scalable service platforms. <https://opendatahub-io.github.io/models-as-a-service/0.0.1/architecture/> [in English]
7. ScienceDirect. (n.d.). Transit accessibility and real-time reliability assessment. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214367X25000729> [in English]
8. Vovk, Y., Vovk, I., Plekan, U., Tson, O., & Oleksyuk, V. (2025). Sustainable and smart logistics centers: Challenges and opportunities for Ukraine's transport system. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 10(1), 116–124. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2025.10-1.8> [in English]
9. European Commission. (n.d.). Multimodal journey planner and EU transport data approaches. https://transport.ec.europa.eu/document/download/76975a24-dd2a-4a0f-8f6f-35560822e1c7_en?filename=2011_09-multimodal-journey-planner.pdf [in English]
10. European Urban Mobility Observatory. (n.d.). Transforming suburban rail: RER-type systems. https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/transforming-suburban-rail-case-study-rer-type-systems-european-metropolitan-areas_en [in English]
11. Transit App Resources. (n.d.). Ridehail and taxi integration perspectives. <https://resources.transitapp.com/article/403-ridehail-and-taxi> [in English]
12. European Commission. (2025, September 12). Ukraine in motion: Inclusive paths ahead. https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/ukraine-motion-inclusive-paths-ahead-2025-09-12_en [in English]
13. Pshinko, O., Charkina, T., Martseniuk, L., & Orlovskaya, O. (2022). HUBs as a key tool for improving the quality of the service and development of multimodal passenger traffic. *Transport Problems*, 17(1), 201–214. <https://doi.org/10.20858/tp.2022.17.1.17> [in English]
14. Naumov, V., Nagornyi, I., & Litvinova, Y. (2015). Model of multimodal transport node functioning. *Archives of Transport*, 36(4), 43–54.

<https://doi.org/10.5604/08669546.1185202>

[in English]

державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: zmii.sergii@kart.edu.ua.
<https://orcid.org/0000-0002-7974-5181>

Abstract. The article addresses scientific and applied aspects of building a digital platform for multimodal passenger transportation focused on the integration of railway transport and taxi services within a unified information environment. The relevance of the study is determined by the need to improve the efficiency of door-to-door travel organization and to ensure the resilience of Ukraine's transport system under martial law and the consequences of the armed aggression of the Russian Federation. Railway transport is considered as the main line-haul regular segment of a multimodal trip, while taxi services provide first-mile and last-mile connectivity and compensate for transport gaps caused by train schedule disruptions. The purpose of the paper is to develop and scientifically substantiate the architecture of a digital platform for multimodal transportation integrating railway data and taxi services, to identify the data required for their information interaction, and to formalize the sequence of data exchange and processing required to organize a multimodal trip. The study applies a systems approach, structural-functional analysis, architectural decomposition, and elements of process and event-driven modeling. As a result, the main groups of data required for interaction between the railway subsystem, taxi services, and the digital platform are identified, including reference, timetable, geolocation, operational, event-driven, and transactional data. An architecture of the digital platform is proposed, including the data source layer, integration layer, multimodal orchestration core, application services, and an analytical layer. A special mechanism for coordinating train time changes with the taxi segment is developed for cases of unforeseen stops, delays, ETA changes, and other schedule disruptions. For Ukrainian conditions, integration with taxi services is substantiated as an adaptive replanning tool for multimodal routes. The scientific novelty lies in the development of an architectural model of a digital platform aimed at event-driven synchronization of regular railway transport with flexible taxi services, as well as in the introduction of a multimodal transfer reliability indicator for assessing route resilience. The practical significance of the results lies in the possibility of applying the proposed solutions to the development of digital multimodal mobility platforms in Ukraine.

Keywords: multimodal transportation, digital platform, railway transport, taxi, MaaS, information interaction, system architecture, data exchange, real-time.

Змій Сергій Олексійович, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український

Калашник Меланія Олександрівна, здобувачка 2 курсу, першого бакалаврського рівня, кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.
<https://orcid.org/0009-0009-2525-6348>. Тел.: +380660257003. E-mail: melaniya.kalashnik@gmail.com.

Меліхов Анатолій Анатолійович, МІПРО ОУ, Таллінн, Естонія. <https://orcid.org/0009-0005-4436-3780>. Тел.: +37256711666. E-mail: melikhov.anatoliy@gmail.com.

Zmii Serhii, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: zmii.sergii@kart.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-7974-5181>.

Kalashnyk Melaniia, 2nd-year student (Bachelor's level), Department of Automation and Computer-Aided Train Motion Control, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. <https://orcid.org/0009-0009-2525-6348>. Тел.: +380660257003. E-mail: melaniya.kalashnik@gmail.com.

Melikhov Anatolii, Mipro OY, Tallinn, Estonia. <https://orcid.org/0009-0005-4436-3780>. Тел.: +37256711666. E-mail: melikhov.anatoliy@gmail.com.

Стаття надійшла 31.08.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 22.09.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширена на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.