

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ
СИНХРОНІЗАЦІЇ РОЗКЛАДУ РУХУ НА МІСЬКИХ АВТОБУСНИХ
МАРШРУТАХ**

Студ. Уколов Є.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

У сучасних умовах розвитку міської мобільності ефективне управління пасажирськими перевезеннями набуває особливої актуальності. Одним із ключових елементів організації раціональної маршрутної мережі є синхронізація розкладу руху міського пасажирського транспорту, що забезпечує узгодженість пересадок, зменшення часу очікування та загального часу поїздки для пасажирів. Забезпечення високого рівня синхронізації є важливою умовою підвищення привабливості громадського транспорту як альтернативи приватному автомобілю.

Проблема синхронізації графіків руху особливо актуальна для великих і середніх міст із розгалуженою маршрутною мережею, де значна частина поїздок передбачає пересадки. У таких умовах навіть незначне відхилення від розкладу може призводити до втрати стикувань і зростання незадоволеності пасажирів. Закордонний досвід країн із розвиненими транспортними системами, таких як Швейцарія, Німеччина, Нідерланди та Канада, демонструє ефективність впровадження стратегій інтегрованого розкладу, заснованих на математичних моделях синхронізації, орієнтованих на мінімізацію часу очікування при пересадках та оптимізацію інтервалів руху.

Наукові дослідження в цій сфері пропонують широкий спектр методів моделювання - від евристичних алгоритмів до моделей лінійного, цілочислового, стохастичного програмування, а також підходів на основі мультикритеріальної оптимізації. Водночас більшість існуючих рішень не враховують динамічний характер пасажиропотоків, варіативність транспортної ситуації та технічні обмеження міських маршрутів. Тому виникає потреба у детальному аналізі існуючих методів, їх адаптації до реальних умов міського середовища України та розробці практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності синхронізації.

Метою цієї статті є здійснення комплексного аналізу сучасних методів моделювання часових параметрів синхронізації розкладу руху на міських автобусних маршрутах, виявлення їх переваг і недоліків, а також окреслення перспектив їх застосування для підвищення якості транспортного обслуговування. Результати дослідження можуть бути використані при стратегічному плануванні міського транспорту, зокрема в умовах реформування маршрутної мережі, впровадження інтелектуальних транспортних систем та створення інтегрованих моделей пересадочних вузлів.

Проблематика синхронізації розкладу руху в системах громадського транспорту є предметом численних досліджень як вітчизняних, так і зарубіжних учених. Основна увага у науковій літературі приділяється розробці моделей, що дозволяють мінімізувати загальний час поїздки пасажирів, втрати часу при пересадках та забезпечити регулярність обслуговування з урахуванням обмежень реального функціонування транспортної мережі.

Класичні дослідження [1-3] в цій галузі ґрунтуються на концепції pulse scheduling, яка передбачає розробку розкладу з фіксованими моментами прибуття і відправлення транспортних засобів у вузлових точках з метою мінімізації часу очікування пасажирів. Подібні підходи набули широкого застосування у

транспортних системах Німеччини та Швейцарії. Подальші модифікації цієї моделі дозволили враховувати обмеження рухомого складу, тривалість пересадки, різні режими експлуатації та сезонні коливання попиту.

У дослідженнях [4] акцент зроблено на мультикритеріальній оптимізації синхронізації - одночасному врахуванні інтервалів руху, кількості транспортних засобів, рівня завантаженості та стабільності графіка. Автором запропоновано методологію створення узгоджених розкладів для маршрутів з пересадковими зв'язками, яка згодом була адаптована в умовах різних країн, включно з Канадою та Ізраїлем.

У ряді досліджень [5] синхронізація розкладів розглядається як частина загальної задачі інтегрованого планування міської транспортної системи, що включає планування маршрутів, визначення частоти руху та управління ресурсами. Сучасні підходи також активно застосовують методи машинного навчання та алгоритми прогнозування пасажиропотоків для динамічної адаптації розкладу.

На території України тема синхронізації розкладу переважно розглядається в рамках загального планування міських маршрутів. Серед вітчизняних досліджень можна відзначити праці, присвячені моделюванню маршрутних систем з урахуванням інтервалів руху та навантаження на вузлові точки. Однак, у більшості випадків акцент робиться на окремих аспектах планування без комплексного математичного обґрунтування синхронізації [6]. Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить про значний досвід застосування математичних моделей для вирішення задач синхронізації в закордонній практиці, тоді як в Україні ця проблема поки що не має достатньо сформованої методологічної бази. Це зумовлює необхідність адаптації існуючих моделей до специфіки національного транспортного середовища, розробки універсального інструментарію та впровадження практичних рішень у міських умовах.

Удосконалення організації міських пасажирських перевезень неможливе без впровадження ефективних методів моделювання часових параметрів, зокрема в частині синхронізації розкладу руху автобусів. У міських умовах, де спостерігається висока щільність маршрутної мережі та значна кількість пересадкових вузлів, питання узгодженості графіків набуває особливої актуальності. Наявність оптимально синхронізованих розкладів сприяє скороченню тривалості поїздок, зменшенню часу очікування при пересадках і, відповідно, підвищенню загальної якості транспортного обслуговування. Одним із перспективних напрямів є впровадження моделей, заснованих на концепції *pulse scheduling*, яка орієнтована на синхронізацію руху в вузлових точках за фіксованим часовим циклом. Цей підхід, що успішно використовується у транспортних системах Швейцарії, Німеччини та Нідерландів, дозволяє ефективно координувати рух різних маршрутів із мінімальними часовими втратами. Застосування таких моделей можливе й у вітчизняних умовах за наявності достовірних даних про пасажиропотік, об'єми перевезень і тривалість поїздок на окремих ділянках маршруту.

Важливим є також розвиток інтегрованих моделей планування, які одночасно враховують графіки руху, частоту курсування та маршрутизацію. Застосування таких підходів дозволяє досягати глобальної оптимізації системи пасажирських перевезень, особливо в умовах обмежених ресурсів і змінного попиту. З огляду на актуальні виклики у сфері міської мобільності, значного поширення набувають моделі, що базуються на методах математичного програмування, а також алгоритмах штучного інтелекту, здатних враховувати варіативність зовнішніх факторів у режимі реального часу. Одним із важливих чинників успішної реалізації

синхронізованого планування є використання спеціалізованого програмного забезпечення. На практиці широке застосування отримали такі програмні продукти:

PTV Visum – багатофункціональна система для транспортного моделювання, яка дозволяє створювати детальні моделі маршрутної мережі, здійснювати оптимізацію розкладів та проводити аналіз впливу змін на пересадкову структуру.

Trapeze Planning Suite – програмний комплекс для автоматизованого планування маршрутів і розкладів громадського транспорту з підтримкою синхронізації в вузлах.

OpenTripPlanner – платформа з відкритим кодом, яка використовується для моделювання та візуалізації мультимодальних маршрутів, з можливістю синхронізації графіків між видами транспорту.

Optibus – хмарне рішення, орієнтоване на динамічне планування розкладів із застосуванням штучного інтелекту та машинного навчання для оперативного реагування на зміни в попиті чи трафіку.

MATSim (Multi-Agent Transport Simulation) – інструмент для моделювання поведінки пасажирів у транспортній мережі, що дає змогу оцінювати ефективність різних варіантів синхронізації розкладу на агентному рівні.

Подальші перспективи пов'язані із впровадженням цифрових інструментів та інтелектуальних транспортних систем, що забезпечують оперативне оновлення розкладів та адаптацію до змін у дорожньо-транспортній ситуації. Завдяки поєднанню статистичних даних з динамічними параметрами (GPS-моніторинг, пасажирооблік, стан дорожньої мережі) можливо здійснювати оперативне переналаштування синхронізованих графіків для досягнення максимальної ефективності перевезень. Варто зазначити, що впровадження зазначених моделей потребує налагодженої міжвідомчої взаємодії між операторами перевезень, муніципальними органами управління транспортом та ІТ-підрозділами. Необхідною передумовою ефективного функціонування є також наявність єдиної бази даних, автоматизованих систем диспетчеризації та відповідного програмного забезпечення для моделювання та оптимізації розкладів.

Таким чином, перспективи застосування сучасних методів моделювання часових параметрів синхронізації розкладу руху на міських автобусних маршрутах пов'язані з переходом до комплексного, динамічного управління системою громадського транспорту. Такий підхід не лише підвищує якість обслуговування пасажирів, а й сприяє зниженню транспортного навантаження на вулично-дорожню мережу, покращенню екологічної ситуації та формуванню сталої моделі міської мобільності. Проведений аналіз сучасних методів моделювання часових параметрів синхронізації розкладу руху автобусів дозволив систематизувати наукові підходи до вирішення завдань узгодження графіків у межах міської маршрутної мережі. Встановлено, що найефективнішими у сучасних умовах є моделі, які поєднують принципи pulse scheduling, мультикритеріальної оптимізації та адаптивного управління з урахуванням варіативності попиту і транспортної ситуації. Окрему увагу приділено аналізу програмного забезпечення, що застосовується для моделювання та оптимізації графіків руху: PTV Visum, Trapeze Planning Suite, Optibus, OpenTripPlanner, MATSim тощо. Показано, що їх застосування дозволяє реалізовувати як стратегічне, так і оперативне планування на основі достовірних даних про пасажиропотоки, інтервали руху та затримки в русі. Встановлено, що впровадження моделей синхронізації доцільно здійснювати комплексно - із забезпеченням інформаційної підтримки диспетчерських служб, автоматизованих систем моніторингу руху та наявністю цифрової транспортної моделі міста. У

перспективі поєднання математичних підходів із інструментами штучного інтелекту, машинного навчання та IoT-технологій створює передумови для побудови динамічних систем управління графіками, адаптованих до реальних умов міської мобільності.

Література

1. Schöbel, A. (2001). *Interval scheduling: A graph-theoretic approach to the modelling of transfer timetables*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04621-4>
2. Dollevoet, T. A. B., Huisman, D., Schmidt, M. E., & Schöbel, A. (2012). Delay management with re-routing of passengers. *Transportation Science*, 46(1), 74–89. <https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0375>
3. Ceder, A. (2007). *Public transit planning and operation: Theory, modeling and practice*. Elsevier. <https://doi.org/10.1201/b12853>
4. Dollevoet, T. A. B., Huisman, D., Schmidt, M., & Zwaneveld, P. (2012). Delay management with re-routing of passengers. *Transportation Science*, 46(1), 74–89. <https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0375>
5. Tomoeda, A., Nishinari, K., Chowdhury, D., & Schadschneider, A. (2007). An information-based traffic control in a public conveyance system: Reduced clustering and enhanced efficiency. *Physical Review E*, 75(4), 040302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.040302>
6. Вдовиченко В.О., Іванов І. Є., Підлубний С. Ю., Іванов Є.І. Структура варіативної оцінки доцільності організації пріоритетного руху міського пасажирського транспорту. Вісник ХНАДУ. 2023. №102. С. 78-86. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.102.1.78>

УДК 656.1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСТАВКИ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ АВТОМОБІЛЬНИМ ТРАНСПОРТОМ У МІСЬКОМУ СПОЛУЧЕННІ

Студ. Чеховський Д.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

В умовах урбанізації та зростання інтенсивності вантажопотоків у містах проблема безпечного транспортування небезпечних вантажів набуває особливої актуальності. Небезпечні вантажі, згідно з класифікацією ADR, включають широкий спектр речовин, які при порушенні умов перевезення можуть становити серйозну загрозу життю та здоров'ю людей, об'єктам інфраструктури та довкіллю. З огляду на це, вибір оптимального методу доставки таких вантажів у межах міського середовища повинен базуватись на комплексному врахуванні логістичних, технічних, правових та безпекових аспектів.

Автомобільний транспорт залишається основним способом доставки небезпечних вантажів на короткі відстані, у тому числі в умовах міста. Проте специфіка міського простору - щільна забудова, інтенсивний трафік, наявність соціально чутливих об'єктів (шкіл, лікарень, житлових масивів) — вимагає особливо ретельного планування маршрутів, часу доставки та забезпечення контролю на всіх етапах перевезення. Порушення навіть одного з факторів може призвести до надзвичайної ситуації, що має соціальні, економічні та екологічні наслідки.