

## АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ РУХУ АВТОБУСІВ НА ПЕРЕГОНАХ МІСЬКОГО МАРШРУТУ В УМОВАХ ВПРОВАДЖЕННЯ ВИДІЛЕНИХ СМУГ

Вдовиченко В. О., Підлубний С. Ю.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** Наведено результати дослідження часових параметрів руху автобусів на перегонах міських маршрутів. На основі натурних спостережень ідентифіковано рівні зручності руху автобусів та проаналізовано причинно-наслідкові зв'язки, що впливають на формування швидкісного режиму на перегонах маршрутів. Запропоновані аналітичні моделі дозволяють проаналізувати часові характеристики руху залежно від типових сценаріїв управління автобусами, визначити доцільність впровадження прийомів прискорення чи уповільнення руху автобуса, а також спрогнозувати час його прибуття до зупинного пункту. Отримані результати дозволяють підвищити рівень точності планування та прогнозування графіків руху автобусів в умовах впровадження виділених смуг громадського пасажирського транспорту.*

***Ключові слова:** аналітичне моделювання, автобусний маршрут, час руху, виділені смуги, швидкісний режим, міський пасажирський транспорт.*

### Вступ

Система міського пасажирського транспорту (МПТ) вимагає підвищення ефективності функціонування автобусної мережі та покращення якості транспортного обслуговування населення.

Одним із ключових аспектів у забезпеченні стабільності та надійності роботи автобусів є впровадження виділених смуг МПТ та обґрунтоване планування часових параметрів руху на маршрутах [1]. Зважаючи на нестабільність транспортного потоку, вплив дорожньо-транспортних умов, інфраструктурних особливостей і поведінкових факторів [2], визначення фактичного часу проїзду автобусами окремих перегонів маршруту потребує використання комплексного аналітичного підходу.

Наявні методи планування графіків руху часто не враховують змінність швидкісних режимів на ділянках з пріоритетним рухом МПТ, що призводить до невідповідності між теоретичними і фактичними параметрами.

Це також знижує рівень дотримання інтервалів, викликає перевантаження транспортних засобів (ТЗ) і зменшує загальну привабливість громадського транспорту для пасажирів.

У цьому контексті особливої актуальності набуває розроблення аналітичних моделей, здатних описувати часові параметри руху автобусів на перегонах міських маршрутів з огляду на режими та умови впровадження виділених смуг руху.

Аналіз розподілу швидкості руху автобусів вздовж перегонів маршрутної мережі міст є складним завданням, що вимагає обліку сукупності різноманітних чинників. Моделі, засновані на попередньому аналізі зібраної інформації про типові умови руху на перегонах маршруту [3], можуть допомогти в оптимізації параметрів руху, зниженні часу в дорозі та покращенні загальної ситуації з обслуговування пасажирів. Статистичні дослідження та їх аналіз дозволять зрозуміти закономірності, які визначають швидкість руху вздовж ділянок маршруту, що також призведе до більш ефективного управління роботою МПТ [4].

### Аналіз публікацій

Прогнозування та моделювання часових параметрів руху автобусів у міських умовах є важливим завданням для підвищення ефективності роботи МПТ, забезпечення надійності обслуговування пасажирів та має науковий інтерес для вчених-транспортників. Велика кількість сучасних досліджень [5–7] зосереджені на розробленні аналітичних і статистичних моделей, які враховують варіативність швидкісних режимів, вплив зовнішніх чинників та невизначеність у русі транспорту.

Одним із підходів є використання байєсівських моделей для прогнозування часу руху автобусів. Наприклад, у роботі [8] автори запропонували модель на основі байєсівської гаусівської суміші, яка враховує взаємодію між послідовними автобусами та до-

звояє моделювати багатомодальні розподіли часу руху, що підвищує точність прогнозування та забезпечує оцінку невизначеності. Проте складність математичного апарату таких моделей потребує значної сукупності точної інформації та значною мірою унеможлиблює їх використання в реальному часі на транспортних підприємствах з обмеженими обчислювальними ресурсами.

Інший підхід наведено в роботі [9]. Автори розробили гібридну марковську модель для реального часу прогнозування руху автобусів з урахуванням невизначеності. Модель використовує максимальне правдоподібне оцінювання та матрицю інформації Фішера для визначення параметрів розподілу часу руху, що дозволяє забезпечити надійні межі довіри для прогнозів.

Однак точність такої моделі значною мірою залежить від якості вихідних даних та їх повноти, а також потребує складного калібрування.

Застосування методів глибокого навчання також застосовується в моделюванні часу руху автобусів. У роботі [10] автори запропонували модель, яка поєднує згорткові та довгострокові короточасні пам'яті (LSTM) нейронної мережі для прогнозування часу руху на декількох ділянках маршруту одночасно, що дозволяє враховувати просторово-часові залежності.

Проте використання таких моделей вимагає великих обсягів навчальних даних, які не завжди можна отримати в умовах реального апаратного забезпечення МПТ, зокрема для малих або середніх міст.

Крім того, використання великих даних й аналізу реальних GPS-даних автобусів дозволяє більш точно визначати час руху. У дослідженні [11], проведеному в м. Монтевідео (Уругвай) було використано інформацію про місцезнаходження автобусів, продаж квитків та розклади для визначення часу руху та виявлення затримок, що сприяє покращенню планування роботи маршрутів. Однак збір та інтеграція такої інформації потребує високого рівня цифровізації транспортної системи та значних інвестицій у обладнання для пошуку й оброблення інформації.

Вітчизняними вченими значна увага приділяється розробленню моделей, що враховують стохастичний тип руху автобусів. Так, у роботі [12] автори запропонували методику визначення диференційованих норм тривалості рейсу автобусів за періодами доби, що

дозволяє збільшити регулярність руху на міських маршрутах.

Проте така методика потребує значного обсягу вхідних даних і попереднього натурального обстеження, що може ускладнити її оперативне застосування в нових умовах експлуатації.

Імітаційне моделювання також застосовують у дослідженнях процесів руху автобусів на маршрутній мережі. У роботі [13] автор обґрунтував доцільність розроблення імітаційних моделей для дослідження роботи автобусів на міських маршрутах, використовуючи агентне моделювання в середовищі AnyLogic.

Попри високу деталізацію цей підхід визначається складністю в налаштуванні та потребує кваліфікованого користувача, що обмежує його застосування на рівні транспортних підприємств.

Незважаючи на значні досягнення, більшість із запропонованих підходів мають певні обмеження щодо застосування, масштабованості та вимог до інформації. Це зумовлює актуальність подальших досліджень, спрямованих на спрощення моделей без втрати точності та адаптацію наявних підходів до реальних умов роботи МПТ.

Актуальним є створення аналітичних моделей, що дозволяють визначати час проїзду перегонів, з урахуванням типових режимів руху автобусів, рівнів зручності та поведінкових факторів, притаманних міському транспортному середовищу.

Такий підхід дозволяє сформулювати наукове підґрунтя для підвищення ефективності управління рухом автобусів у міських умовах.

### Мета та постановка задачі

Метою дослідження є встановлення сукупності аналітичних моделей для визначення часових параметрів руху автобусів на перегонах міського маршруту.

Для досягнення поставленої мети в дослідженні вирішувалися такі основні завдання:

– на основі натурних обстежень руху автобусів ідентифіковано типові умови формування швидкісних режимів на перегонах маршрутної мережі;

– проаналізовано та визначено причинно-наслідкові зв'язки, що впливають на формування швидкісного режиму руху автобусів на окремих перегонах маршрутів;

– розроблено аналітичні моделі, що дозволяють визначати часові параметри руху

автобусів на перегонах міського маршруту з урахуванням виявлених закономірностей.

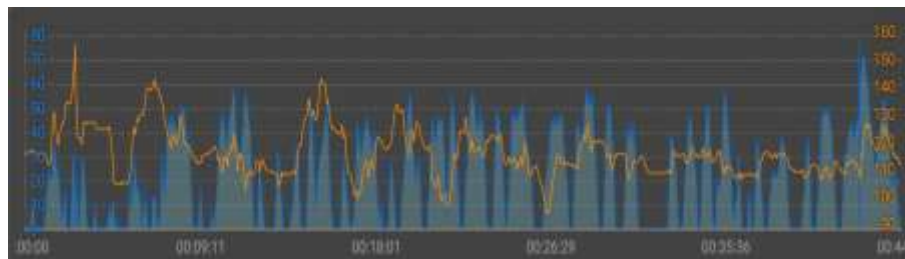
#### Виклад основного матеріалу

Для дослідження розподілу швидкості маршрутних ТЗ можна використовувати такі статистичні методи, як аналіз дисперсії і побудова функцій густини ймовірності [14]. Крім того, важливо враховувати вплив транспортної інфраструктури, зокрема наявність світлофорів, дорожніх знаків, зупинних пунктів і ступінь завантаженості перегонів мережі дорожнім рухом. Мета такого структурного аналізу полягає в розумінні поточних тенденцій формування тривалості рейсу, що робить можливим створення більш точних моделей і підвищує об'єктивність прогнозування показників транспортного обслуговування пасажирів на маршрутах.

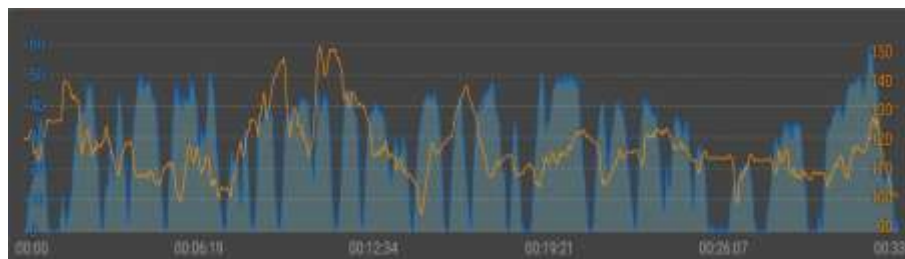
В умовах організації руху міських автобусних маршрутів за розкладом їх режими на перегонах розглядаються як керована подія. Залежно від поточної ситуації водій автобуса

приймає рішення щодо зміни швидкісного режиму, орієнтуючись на вимогу забезпечення своєчасності прибуття до зупинного пункту (ЗП). Водночас використання різноманітних прийомів керування автобусом залежить від деяких чинників, що в комплексі визначають рівень зручності руху автобуса на перегоні маршруту.

Базовою інформацією для аналізу режимів руху автобусів на перегонах маршруту є результати спостережень за ним. За допомогою мобільного застосунку GalileoGPS Speedometr було проведено низку спостережень за зміною швидкісного режиму руху автобусів на міському маршруті № 900 (м. Ганновер) у сполученні Hauptbahnhof – Altwarmbüchen Seestraße. На рис. 1 наведено зміну швидкості руху автобуса під час рейсу для двох випадків (рис. 1а – рух автобусів у період пікового завантаження вулиць; рис. 1б – у період вільних умов руху мережею). У табл. 1 наведено параметри руху автобуса вздовж маршруту для визначених ситуацій.



а



б

Рис. 1. Графік зміни швидкості руху на маршруті № 900 (м. Ганновер)

Таблиця 1 – Параметри руху автобуса на маршруті № 900 (м. Ганновер)

Параметр	Період пікового завантаження вулиць	Період вільних умов руху вулицями
Середня експлуатаційна швидкість, км/год	20,5	27
Середня швидкість без непродуктивних простоїв, км/год	24,2	28,1
Середня технічна швидкість, км/год	26,1	34,7
Максимальна швидкість, км/год	68,3	60,1
Час рейсу, хв	44:28	33:48
Час у роботі (зокрема простій на ЗП), хв	37:41	32:36
Час простою, хв	6:46	1:22

Аналізуючи графік зміни швидкості руху (рис. 1а) можна визначити такі особливості здійснення рухових операцій у період пікового завантаження вулиць:

- наявна значна кількість операцій з уповільнення та розгону автобуса (49 циклів за наявності 11 зупинних пунктів і 18 місць можливої зупинки – перехресть вулиць і пішохідних переходів);

- середнє значення технічної швидкості є низьким (26,1 км/год), що обумовлено малою питомою вагою часу сталого руху;

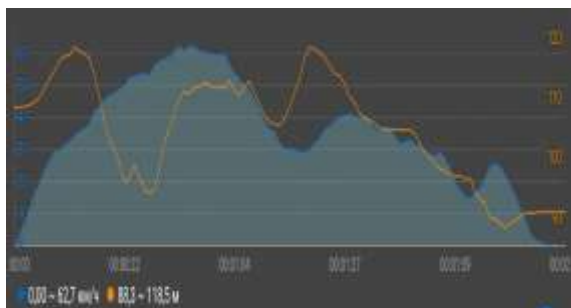
- частка непродуктивного простою автобуса складає 15,2 %, основна частина простоїв відбувається через проїзд ділянок вулично-дорожньої мережі (ВДМ), де спостерігається висока щільність транспортного потоку;

- існують декілька видів типових ділянок ВДМ, що свідчить про наявність різних умов руху на маршруті та дозволяє надалі визначити типові умови зручності руху маршрутних ТЗ;

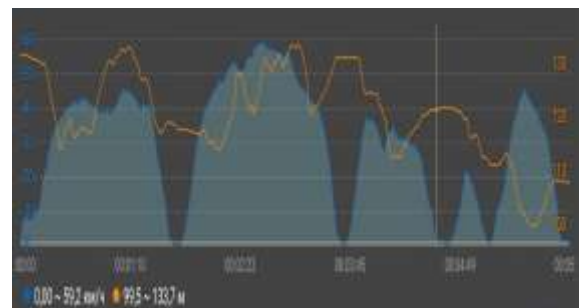
- є окремі ЗП, у межах яких спостерігається значна тривалість простою автобусів через очікування пасажирів або синхронізацією часу міжмаршрутної пересадки;

- для усунення запізнення прибуття автобусів до ЗП, що виникає під час простоїв і затримок на ділянках з вільними умовами руху, водії використовують прийом збільшення швидкості руху (нагін).

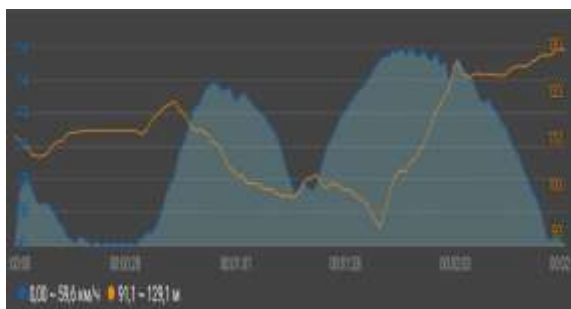
Надалі масив вихідної інформації був розширений внаслідок проведення натурних спостережень на окремих перегонах автобусних маршрутів № 900 (м. Ганновер), № 32 (м. Любек), № 32 (м. Дніпро), № 141 (м. Дніпро). Під час аналізу зміни швидкості автобусів на перегонах маршрутів визначено, що існує 6 типових ситуацій руху. На рис. 2 наведені типові графіки зміни швидкості руху автобусів для перегонів маршрутів з різними рівнями зручності руху.



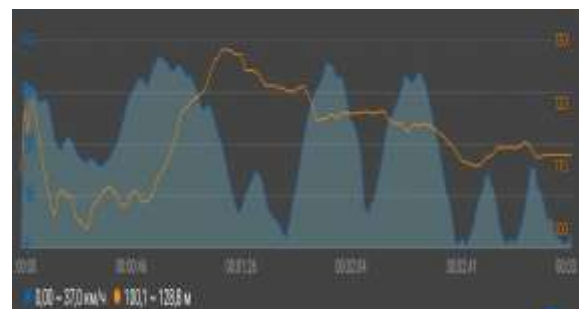
а



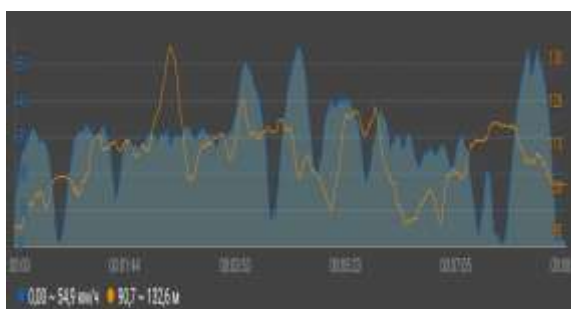
б



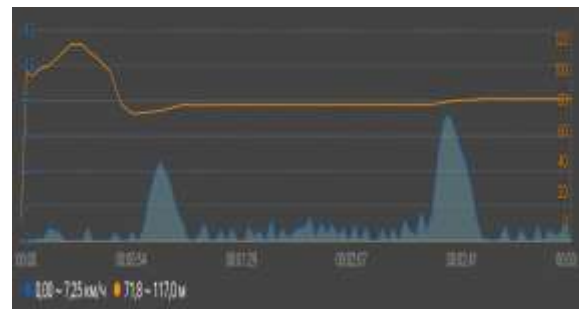
в



г



д



е

Рис. 2. Графіки зміни швидкості для перегонів маршруту з різними рівнями зручності руху

У процесі аналізу швидкісного режиму руху автобусів на перегонах маршрутів було виявлено істотну варіативність середніх швидкостей, що зумовлена як інфраструктурними, так й організаційними чинниками. Для забезпечення об'єктивного аналізу умов руху та подальшого моделювання часових параметрів виникла необхідність класифікувати їх за рівнями зручності руху. Рівнем зручності руху автобуса є якісна характеристика транспортного процесу на перегоні, яка визначає ступінь впливу зовнішніх факторів (інтенсивність транспортного потоку, кількість перешкод, частота розташування ЗП, світлофорне регулювання, стан дороги тощо) на можливість водієм дотримуватись вибраного швидкісного режиму.

На основі аналізу фактичних даних швидкості на перегонах та її дисперсії, а також зіставлення з умовами руху було доцільно визначити шість рівнів зручності руху автобусів. На рис. 2 наведено такі типові умови: а – перегін маршруту з вільними умовами руху для автобуса та без зупинок на перехрестях (рівень зручності А); б – перегін маршруту з вільними умовами руху для автобуса та з зупинками на перехрестях (рівень зручності В); в – перегін маршруту з ускладненням руху на початку та з подальшим виїздом до ділянок вільного руху (рівень зручності С); г – перегін маршруту з вільними умовами руху на його початку та з ускладненням руху на другій частині (рівень зручності D); д – ділянка зі щільністю руху вздовж ВДМ вище за середній рівень завантаження та з зупинками на перехрестях (рівень зручності Е); е – ділянка з дуже високою щільністю руху та його заторовим станом (рівень зручності F).

Аналіз графіків руху автобусів свідчить про те, що залежно від конкретної дорожньої ситуації водій може застосовувати різноманітні прийоми щодо вибору швидкісного режиму. Наприклад, на рис. 2а, що відповідає рівню зручності руху А (вільний рух), зафіксовано випадок, коли автобус спочатку поступово набирає швидкість до 60 км/год, після чого знижує її та підтримує на рівні приблизно 40 км/год. Така поведінка пояснюється необхідністю дотримання своєчасності прибуття до ЗП завдяки зниженню швидкості наприкінці перегону маршруту.

На рис. 2б (рівень зручності В) в умовах вільного руху з наявністю перехресть рух автобуса поділений на певні цикли, для яких визначальними є етапи розгону, сталого руху та уповільнення. Під час формування сталого

руху на першому етапі середня швидкість автобуса складає 40 км/год, на другому етапі – більше ніж 50 км/км, надалі стала швидкість автобуса зменшується. Це пояснюється тим, що водій спочатку прагнув дотримуватись графіка руху на маршруті, а надалі він прийняв рішення щодо зниження сталого швидкісного режиму, оскільки він випереджає графік прибуття до ЗП.

На рис. 2 в (рівень зручності С) відтворено режим руху автобуса, який виїжджає з центральної частини міста з щільним транспортним потоком на ділянку ВДМ з вільними умовами руху. На першому етапі автобус рухається з досить малою швидкістю через високу щільність транспортного потоку. Після перетину перехрестя автобус в'їжджає в зону з низькою щільністю транспортного потоку, що дозволяє йому підвищити швидкість до 50 км/год, але подальше гальмування транспортного потоку переводить його в режим уповільнення автобуса. Після проходження ділянки ускладненого руху водій приймає рішення щодо ліквідації затримок часу, які виникли на початку перегону через підвищення швидкісного режиму до 60 км/год.

На рис. 2г (рівень зручності руху D) подані умови, за яких рух автобуса спочатку здійснюється вулицями з вільними умовами, а потім центральною частиною міста. Там знаходяться вулиці, що перевантажені рухом і мають рівень щільності транспортного потоку вище за середнє значення. Під час руху автобус не може дотримуватися сталого режиму та не може нагнати запізнення по відставанню від графіка. Окремі збільшення швидкості руху пов'язані з тим, що під час пакетного руху транспортного потоку можуть виникати уповільнення інших автомобілів і водій прагне ліквідувати певне відставання через збільшення швидкості з подальшим виходом на сталий режим руху.

На рис. 2д (рівень зручності Е) подані умови руху зі щільним транспортним потоком та ускладненими умовами руху. За таких умов максимальна швидкість руху автомобіля складає не більше ніж 35 км/год. Водночас наявні періоди, коли швидкість руху автобуса перебуває в межах від 10 км/год до 20 км/год. Така ділянка є визначальною для умов руху автобусів зі щільними транспортними потоками, але без заторів.

Наявність щільного транспортного потоку призводить до виникнення постійних заторів на перегоні. На рис. 2е (рівень зручності F)

наведено умови здійснення руху автобуса вздовж перегону маршруту в умовах постійних заторів. У цьому випадку виникає ситуація, коли водій автобуса не може розвинути нормальну швидкість руху через те, що є потреба в постійних зупинках. Кількість циклів гальмування та розгону протягом проїзду перегону маршруту може досягати до 20 од. на 1 км. шляху.

Зазвичай такі умови не мають спостерігатися на маршруті, оскільки це призводить до унеможливлення не лише дотримання водієм планових норм на проїзд перегону маршруту, а також значною мірою зменшує привабливість маршрутів МПТ.

Зазначені типові режими проїзду перегонів маршруту насамперед залежать від рівня завантаження рухом транспортним потоку та кількості перехресть.

Аналіз варіативності фактичних режимів руху автобусів вздовж перегонів маршрутів щодо дотримання розкладу прибуття до ЗП дозволяє визначити типові умови проїзду автобусів крізь перегони маршрутів та враховувати їх під час формування аналітичних моделей прогнозування часових параметрів руху.

На рис. 3 наведено типові схеми зміни швидкісного режиму руху автобусів вздовж перегонів маршрутів для різних рівнів зручності руху. У табл. 2 наведено параметри типових умов руху на ділянках маршрутів.

У процесі моделювання руху на перегонах з виділених смугами МПТ доцільним є виокремлення трьох режимів зручності руху автобусів: А, В та С. Такий підхід дозволяє визначити типові сценарії взаємодії автобусів із транспортним середовищем за наявності пріоритету руху.

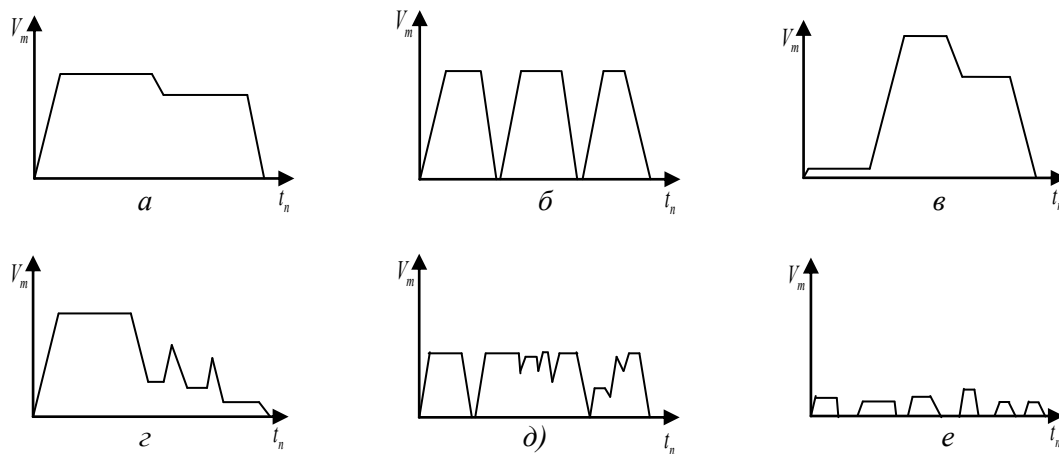


Рис. 3. Типовий графік зміни швидкості на перегонах маршруту

Таблиця 2 – Параметри типових умов руху на ділянках маршруту

Показник	Рівень зручності руху					
	А	В	С	Д	Е	Ф
Середня експлуатаційна швидкість, км/год	38,1	31,7	32,5	27,9	19,8	8,9
Середня швидкість без простоїв, км/год	38,1	34	35,1	30,8	21,6	17
Максимальна швидкість, км/год	63,4	59,6	60,3	54,9	36,9	22,7
Питома вага продуктивного часу, %	100	93,4	92,9	90,4	91,9	52,5
Питома вага простою, %	0	6,6	7,1	9,6	8,1	47,5
Наявність сталого режиму руху	так	так	частково	обмежено	обмежено	ні
Швидкість руху в сталому режимі, км/год	52–60 33–40	38–44 53–57	46–50	30–35	28–33	-
Можливість компенсації запізнення на ділянці	так	так	так	ні	ні	ні
Швидкість руху в режимі компенсації запізнення, км/год	63,4	59,6	60,3	-	-	-

Варіант, поданий на рис. 3а є типовим для рівня зручності А. Тривалість проїзду автобусом перегону маршруту може визначатися на основі типового графіка руху, що поданий на рис. 4.

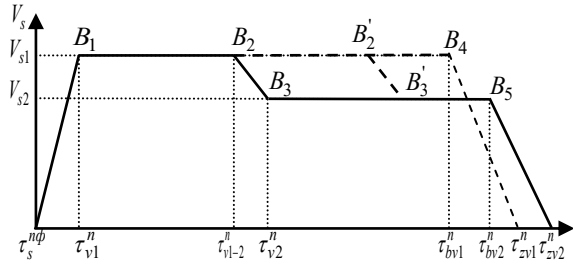


Рис.4. Типовий графік руху автобуса для рівня зручності А

Початком руху вздовж перегону маршруту є момент часу  $\tau_s^n$ . У початковому інтервалі часу  $\tau_s^{n\phi} - \tau_{v1}^n$  водій здійснює розгін ТЗ до швидкості  $V_{s1}$ , що є початковим сталим режимом руху. Значення цієї швидкості  $V_{s1}$  може бути обмежене встановленими нормативами правил дорожнього руху або визначене на основі статистичного аналізу даних, отриманих у процесі натурних обстежень за рухом автобусів на цьому перегоні. Надалі в межах часово-просторового інтервалу  $\tau_{v1}^n - \tau_{v1-2}^n$  автобус продовжує рух зі сталою швидкістю  $V_{s1}$ . У певній точці траєкторії проїзду перегону маршруту  $B_2$  водій приймає рішення щодо подальшого швидкісного режиму. Якщо автобус випереджає графік прибуття до наступного ЗП, водій може знизити швидкість і перейти до нової сталої швидкості  $V_{s2}$ . У разі очевидного запізнення прибуття автобуса до ЗП його рух продовжується на сталому рівні  $V_{s1}$  до контрольної точки  $B_4$  або  $B_2'$ , залежно від ситуації. Вибір водієм швидкісного режиму в контрольній точці  $B_2$  безпосередньо впливає на час прибуття автобуса до наступного ЗП. Варіант скорочення тривалості проходження перегону з досягненням зупинки в момент  $\tau_{zv1}^n$  є доцільним у випадку, коли фіксується відставання від графіка руху. Зокрема, якщо фактичний час відправлення з попередньої зупинки  $\tau_s^{n\phi}$  перевищує запланований час  $\tau_s^{nn}$ , водій може прийняти рішення про зменшення часу руху вздовж перегону, що дозволяє компенсувати відставання та забезпечити

прибуття до ЗП в момент  $\tau_{zv1}^n$ . У ситуації, коли рух здійснюється згідно з розкладом, водій зазвичай орієнтується на забезпечення прибуття до ЗП в момент  $\tau_{zv2}^n$ , що дорівнює плановому часу відправлення автобуса в наступний перегін маршруту  $\tau_{s+1}^{n\phi}$  з урахуванням регламентованого часу стоянки на ЗП:

$$\tau_{zv2}^n = \tau_{s+1}^{nn} - t_{s+1}^n, \quad (1)$$

де  $\tau_{s+1}^{nn}$  – момент часу планового відправлення автобуса з наступного ЗП, хв;  $t_{s+1}^n$  – планова тривалість перебування автобуса на наступному ЗП, хв.

Якщо спостерігається значне запізнення від часу відправлення з початкового ЗП ( $\tau_s^{n\phi} > \tau_s^{nn}$ ) та його неможливо компенсувати прискоренням автобуса на перегоні, тоді тривалість пересування на перегоні складає

$$t_n^{A1} = t_p + 60 \frac{l_n - l_p - l_y}{V_{s1}} + t_y, \quad (2)$$

де  $t_p$  – тривалість маневрування під час виїзду з ЗП та розгону до швидкості  $V_{s1}$ , хв;  $t_y$  – тривалість операцій уповільнення автобуса та маневрування під час заїзду до ЗП, хв;  $l_n$  – відстань між ЗП перегону маршруту, км;  $l_p$  – шлях розгону автобуса, км;  $l_y$  – шлях під час уповільнення автобуса, км.

Ступінь критичності запізнення прибуття до ЗП визначається з урахуванням можливості його компенсації за умови руху автобуса з максимально допустимою швидкістю. У випадку, якщо потенційний час для компенсації є меншим за величину запізнення, то, навіть за умов вільного руху, водій буде змушений підтримувати максимально допустиму швидкість протягом усього перегону. Час, необхідний для потенційного нагону відставання від розкладу, обчислюється за формулою

$$\Delta t_n = \tau_{s+1}^{nn} - t_{s+1}^n - \tau_s^{n\phi} - t_n^{A1}. \quad (3)$$

У цьому випадку стале значення максимальної швидкості руху  $V_{s1}$  застосовується за умови

$$\Delta t_n \leq \tau_s^{n\phi} - \tau_s^{nm} . \quad (4)$$

У випадку, коли запізнення щодо графіка прибуття до ЗП може бути компенсоване завдяки прискореному руху ( $\Delta t_n > \tau_s^{n\phi} - \tau_s^{nm}$ ) або коли відставання відсутнє ( $\tau_s^{n\phi} = \tau_s^{nm}$ ), на перегоні застосовуються два швидкісних режими:  $V_{s1}$  та  $V_{s2}$ . За таких умов водій має можливість реалізувати один із двох підходів до керування автобусом:

- вибір моменту переходу між швидкостями здійснюється з урахуванням прибуття до ЗП згідно з розкладом;
- керування здійснюється з орієнтацією на уникнення запізнення, що може призвести до прибуття до ЗП з незначним випередженням.

Аналіз динаміки рухових операцій свідчить про те, що другий підхід використовується рідше та переважно в ранкові або вечірні години за низького рівня пасажиропотоку та попиту на маршруті. У зв'язку з цим як основний для подальшого моделювання доцільно використовувати перший підхід. За цих умов час проходження перегону визначається як різниця між відповідними часовими параметрами:

$$t_n^{A2} = \tau_{s+1}^{nm} - t_{s+1}^n - \tau_s^{n\phi} . \quad (5)$$

Варіант на рис. 3б є доцільним для рівня зручності В, за якого зміна умов руху визначається за графіком, що наведений на рис. 5.

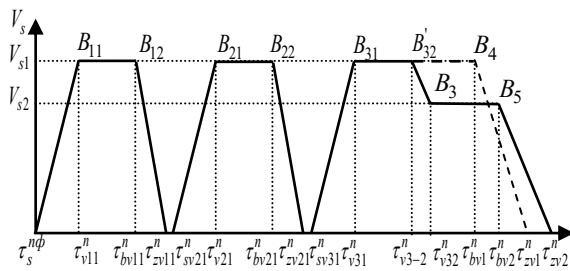


Рис.5. Типовий графік руху автобуса для рівня зручності В

Для рівня зручності В типовим є рух автобуса у вільних умовах, за якого можливе досягнення максимальної сталої швидкості  $V_{s1}$  на окремих ділянках перегону між перехрестями вулиць. Час проїзду перегону залежить від двох умов: наявності запізнення від розкладу руху автобуса та рівня організованості проїзду перехресть. Розглянемо як основну модель умову, за якої проїзд перехресть здійснюється без черги потягом одно-

го світлофорного циклу. У цьому випадку за наявності значного запізнення відправлення з ЗП ( $\tau_s^{n\phi} > \tau_s^{nm}$ ) час проїзду перегону маршруту складає

$$t_n^{A1} = \sum_{i=1}^{n_n^x} \left( t_{pi} + 60 \frac{l_{ni}^x - l_{pi}^x - l_{yi}^x}{V_{s1i}} + t_{yi} \right) + \sum_{j=1}^{n_n^x-1} t_{xj} , \quad (6)$$

де  $t_{pi}$  – час розгону автобуса, хв;  $t_{yi}$  – час уповільнення автобуса, хв;  $l_{ni}^x$  – довжина перегону, км;  $l_{pi}^x$  – довжина ділянки розгону автобуса, км;  $l_{yi}^x$  – довжина ділянки уповільнення автобуса, км;  $t_{xj}$  – час простою перед перехрестям та його проїзду, хв.

Під час руху автобуса за графіком водій використовує прийом керування, за якого він для забезпечення своєчасності прибуття до ЗП в певний момент часу знизить швидкість руху автобуса до  $V_{s2}$ . За таких умов час руху на перегоні визначається за формулою (5). У разі використання системи управління світлофорною сигналізацією з урахуванням руху МПТ можлива повна ліквідація затримок руху під час проїзду перехресть. Такий режим повною мірою дорівнює рівню зручності А.

Впровадження виділених смуг руху для МПТ може здійснюватися на окремих ділянках ВДМ та на певних перехрестях. Тому досить часто трапляються ситуації застосування варіанта, поданого на рис. 3в, що дорівнює зручності руху С. Графік зміни швидкісного режиму для рівня зручності руху С наведено на рис. 6. За такого варіанта на першій частині перегону рух є досить ускладненим, що не дозволяє розвинути автобусу швидкість вільного руху. Надалі під час вїзду на ділянку з виділеною смугою МПТ відбувається збільшення швидкості руху.

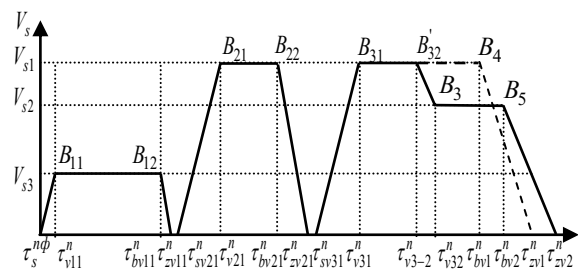


Рис.6. Типовий графік руху автобуса для рівня зручності С



Таблиця 3 – Аналітичні моделі визначення часу проїзду перегону маршруту

Рівень зручності руху автобуса	Із затримкою відправлення з ЗП	Без затримки відправлення з ЗП
A	$t_n^{A1} = t_p + 60 \frac{l_n - l_p - l_y}{V_{s1}} + t_y$	$t_n^{A2} = \tau_{s+1}^{nm} - t_{s+1}^n - \tau_s^{n\phi}$
B	$t_n^{A1} = \sum_{i=1}^{n_n^x} (t_{p_i} + 60 \frac{l_{n_i}^x - l_{p_i}^x - l_{y_i}^x}{V_{s1i}} + t_{y_i}) + \sum_{j=1}^{n_n^x-1} t_{x_j}$	$t_n^{A2} = \tau_{s+1}^{nm} - t_{s+1}^n - \tau_s^{n\phi}$
C	$t_n^{A1} = \sum_{i=1}^{n_n^x} (t_{p_i} + 60 \frac{l_{n_i}^x - l_{p_i}^x - l_{y_i}^x}{V_{s1i}} + t_{y_i}) + \sum_{j=1}^{n_n^x-1} t_{x_j}$	$t_n^{A2} = \tau_{s+1}^{nm} - t_{s+1}^n - \tau_s^{n\phi}$

За таких умов час проїзду перегону маршруту в разі запізнення можна визначити за формулою (6). У цьому випадку на ділянках з ускладненим рухом швидкість  $V_{s3}$  буде значно меншою за  $V_{s1}$  та  $V_{s2}$ .

Залежно від рівня зручності руху автобуса та відхилення від розкладу відправлення із ЗП може бути використано аналітичні моделі розрахунку витрат часу на проїзд перегону маршруту. У табл. 3 подано аналітичні моделі визначення часу проїзду перегону маршруту для умов, що визначальні для впровадження виділених смуг МПТ на ділянках ВДМ.

Розроблені аналітичні моделі часових параметрів руху можуть бути ефективно застосовані для моделювання руху автобусів на перегонах із виділеними смугами. Це дозволить здійснювати більш точне прогнозування транспортних процесів, сприятиме підвищенню точності розкладів та ефективності управління пасажирськими перевезеннями.

### Висновки

У статті розглянуто підходи до аналітичного моделювання часових параметрів руху автобусів на перегонах міських маршрутів з акцентом уваги на типові прийоми управління автобусами в умовах функціонування виділених смуг МПТ. Основою для моделей є результати натурних обстежень швидкісного режиму автобусів. Це дозволило ідентифікувати типові прийоми управління рухом на перегонах та визначити 6 рівнів зручності руху автобусів, які містять різні сценарії взаємодії автобусів із транспортним середовищем.

Визначено, що в умовах використання виділених смуг МПТ вплив випадкових зовнішніх факторів може бути компенсовано певними швидкісними режимами руху, що забезпечує більшу передбачуваність часових

параметрів прибуття до ЗП. Це дозволяє ефективно застосовувати аналітичні моделі для визначення часу проїзду на перегоні з огляду як на запізнення, так і випередження графіка руху.

Ці залежності дозволяють моделювати зміну швидкості в межах різних типів перегонів маршрутів, визначати доцільність впровадження прискорення чи уповільнення руху автобуса, а також прогнозувати точний час його прибуття до ЗП. Це відкриває перспективу для впровадження моделей адаптивного формування розкладу руху та вдосконалення систем управління громадським транспортом у містах.

Загалом результати дослідження підтверджують ефективність впровадження аналітичного підходу до моделювання руху автобусів як способу підтримки прийняття рішень у сфері управління міськими пасажирськими перевезеннями.

### Література

- Вдовиченко В. О., Підлубний С. Ю. Вплив виділених смуг міського пасажирського транспорту на умови синхронізації міжмаршрутної пересадки пасажирів. *Вісник ХНАДУ*. 2024. № 107. 130–139. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.130>
- Yevchuk Y. Speed of urban public transport as criterion of the justification of spatial and time-based prioritization. *Transport Technologies*. 2024. Vol. 5. No. 2. 33–41. <https://doi.org/10.23939/tt2024.02.033>
- Teng J., Lai X. An integrated method for urban transit evaluation and optimization. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. 9(5). 1–11. <https://doi.org/10.1177/1687814017708144>
- Empirical Performance Analysis of Bus Speed and Delay at Intersections for Emerging Spot Improvement Programs / G. Devitt et. al. *Transportation Research Record*. 2020. Т. 2674. № 3. 57–68. <https://doi.org/10.1177/0361198120909108>
- Rodriguez-Deniz H., Villani M. Robust Real-Time Delay Predictions in a Network of High-

- Frequency Urban Buses. *EEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. 23(9), 16304–16317. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.13576>
6. Predicting the probability distribution of bus travel time to measure the reliability of public transport services / L. Ricard et. al. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2022. 138. 103619. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103619>
  7. Zhuk M., Kovalyshyn V., Hilevych V. Forecasting of urban buses dwelling time at stops. *Transport Technologies*. 2020. Vol. 1. No. 2. 44–56. <https://doi.org/10.23939/tt2020.02.044>
  8. Probabilistic forecasting of bus travel time with a Bayesian Gaussian mixture model / X. Chen et. al. *Transportation Science*. 2023. 57(6), 1516–1535. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.06915>
  9. Real-time Bus Travel Time Prediction and Reliability Quantification: a Hybrid Markov Model / Y. Sun et. al. *Preprint*. 2025. 05907. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.05907>
  10. Petersen N. C., Rodrigues F., Pereira F. C. Multi-output bus travel time prediction with convolutional LSTM neural network. *Expert Systems with Applications*. 2019. 120. 426–435. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.11.028>
  11. Big data analysis for travel time characterization in public transportation systems / S. Neshmachnow et. al. *Sustainability*. 2023. 15(19). 14561. <https://doi.org/10.3390/su151914561>
  12. Литвин В., Клименко І, Кучер О. Розробка диференційованих норм тривалості рейсу автобусів за періодами доби для підвищення регулярності руху. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 2024. №2(23). 142–151. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1536>
  13. Дашдаміров Ф. Створення симуляційної моделі руху автобусів на міських маршрутах. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер. Технічні науки*. 2020. (41). 205–211. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.41.2020.226216>
  14. Zefreh M. M., Török A. Distribution of traffic speed in different traffic conditions: an empirical study in Budapest. *Transport*. 2020. 35(1). 68–86. <http://dx.doi.org/10.3846/transport.2019.11725>
  3. Teng, J., Lai, X. An integrated method for urban transit evaluation and optimization. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. 9(5). 1–11. <https://doi.org/10.1177/1687814017708144>
  4. Devitt, G., Mahmoodi Nesheli, M., Diab, E., Shalaby, A. Empirical Performance Analysis of Bus Speed and Delay at Intersections for Emerging Spot Improvement Programs. *Transportation Research Record*. 2020. T. 2674. № 3. 57–68. <https://doi.org/10.1177/0361198120909108>
  5. Rodriguez-Deniz, H., Villani, M. Robust Real-Time Delay Predictions in a Network of High-Frequency Urban Buses. *EEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. 23(9). 16304–16317. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.13576>
  6. Ricard, L., Desaulniers, G., Lodi, A., Rousseau, L.-M. Predicting the probability distribution of bus travel time to measure the reliability of public transport services. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2022. 138. 103619. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103619>
  7. Zhuk, M., Kovalyshyn, V., Hilevych, V. Forecasting of urban buses dwelling time at stops. *Transport Technologies*. 2020. Vol. 1, No. 2. 44–56. <https://doi.org/10.23939/tt2020.02.044>
  8. Chen, X., Cheng, Z., Jin, J. G., Trépanier, M., Sun, L. Probabilistic forecasting of bus travel time with a Bayesian Gaussian mixture model. *Transportation Science*. 2023. 57(6). 1516–1535. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.06915>
  9. Sun, Y., Spall, J., Wong, W., Zhao, X. Real-time Bus Travel Time Prediction and Reliability Quantification: a Hybrid Markov Model. *Preprint*. 2025. 05907. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.05907>
  10. Petersen, N. C., Rodrigues, F., Pereira, F. C. Multi-output bus travel time prediction with convolutional LSTM neural network. *Expert Systems with Applications*. 2019. 120. 426–435. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.11.028>
  11. Neshmachnow, S., Massobrio, R., Guridi, S., Olmedo, S., Tchernykh, A. Big data analysis for travel time characterization in public transportation systems. *Sustainability*. 2023. 15(19). 14561. <https://doi.org/10.3390/su151914561>
  12. Lytvyn, V., Klymenko, I., Kucher, O. Development of differentiated norms of bus trip duration by periods of the day for increasing the movement regularity. *Advances in mechanical engineering and transport*. 2024. №2(23). 142–151. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1536>
  13. Dashdamirov, F. Creation of a simulation model of bus traffic in urban routes. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*. 2020. (41). 205–211. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.41.2020.226216>
  14. Zefreh, M. M., Török, A. Distribution of traffic speed in different traffic conditions: An empirical study in Budapest. *Transport*. 2020. 35(1). 68–86. <http://dx.doi.org/10.3846/transport.2019.11725>

### References

1. Vdovychenko, V., Pidlubnyi, S. The effect of dedicated lanes of urban passenger transport on the conditions of synchronization of inter-route passenger transfers. *Bulletin KhNAHU*. 2024. № 107. 130–139. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.130>
2. Yevchuk, Y. Speed of urban public transport as criterion of the justification of spatial and time-based prioritization. *Transport Technologies*. 2024. Vol. 5. No. 2. 33–41. <https://doi.org/10.23939/tt2024.02.033>

Вдовиченко Володимир Олексійович, д.т.н.,  
проф. каф. транспортних технологій,  
[vval2301@gmail.com](mailto:vval2301@gmail.com),  
тел. +38050-403-17-10,  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2746-8175>  
Підлубний Сергій Юрійович<sup>1</sup>, аспірант каф.  
транспортних технологій,  
[pidlubnyi\\_s@ukr.net](mailto:pidlubnyi_s@ukr.net), тел. +38050-362-40-42,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4840-7363>

Харківський національний автомобільно-  
дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого,  
25, м. Харків, 61002, Україна.

### Analytical modeling of bus travel time parameters on urban route segments under the conditions of dedicated lane implementation

**Abstract. Problem.** Modern urban public transport systems face the challenge of ensuring schedule adherence and improving the efficiency of bus operations, particularly under conditions of variable traffic and complex infrastructure. A key issue remains the insufficient accuracy of forecasting bus travel time on individual route segments, even with the implementation of dedicated lanes. This necessitates the development of analytical tools that take into account the impact of both external and organizational factors on bus speed patterns. **Goal.** The objective of this study is to develop a set of analytical models for determining the temporal parameters of bus movement on segments of urban routes, considering the features of dedicated public transport lanes and characteristic traffic patterns. **Methodology.** The study is based on field observations of bus movement on the route, using the mobile application GalileoGPS Speedometer. A detailed analysis of changes in speed was conducted, leading to the identification of typical operating conditions on route segments. The conditions were classified into 6 levels of movement convenience, reflecting the interaction between the bus and the surrounding traffic environment. Based on the data collected, analytical dependencies were formulated to describe the travel time under

varying conditions. **Results.** The developed analytical models account for speed variability and movement convenience levels, enabling precise modeling of bus travel times on different route segments. The models consider both delays and schedule advancements. Six typical interaction scenarios between buses and the traffic environment were identified, allowing for accurate predictions of speed changes and arrival times at stops. **Originality.** The scientific novelty of the study lies in the systematic and analytical description of bus movement regimes with a focus on dedicated lane operation. A new approach is proposed for classifying bus movement convenience levels based on objective environmental parameters, enhancing the accuracy of arrival time prediction and enabling the development of adaptive schedules. **Practical value.** The proposed models can be integrated into intelligent transportation systems to improve timetable accuracy, facilitate the creation of adaptive schedules, and optimize route planning. Their implementation enhances the reliability and stability of public transport operations, which is particularly relevant for large cities with high mobility demands.

**Key words:** analytical modeling, bus route, travel time, dedicated lanes, speed regime, urban public transport.

**Volodymyr Vdovychenko**, Doctor of technical sciences, Professor, Department of Transport Technology,  
[vval2301@gmail.com](mailto:vval2301@gmail.com),  
+38 050-403-17-10,  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2746-8175>  
**Serhii Pidlubnyi**<sup>1</sup>, Postgraduate Student, Department of Transport Technology,  
[pidlubnyi\\_s@ukr.net](mailto:pidlubnyi_s@ukr.net),  
тел. +38050-362-40-42,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4840-7363>

Kharkiv National Automobile and Highway  
University, 25, Yaroslav Mudry str., Kharkiv,  
Ukraine, 61002.