

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 656.072

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.130

ВПЛИВ ВИДІЛЕНИХ СМУГ МІСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО
ТРАНСПОРТУ НА УМОВИ СИНХРОНІЗАЦІЇ МІЖМАРШРУТНОЇ
ПЕРЕСАДКИ ПАСАЖИРІВ

Вдовиченко В. О., Підлубний С. Ю.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті розглянуто вплив умов руху автобусів вздовж перегонів маршрутів з виділеною смугою маршрутного пасажирського транспорту на параметри синхронізації пересадки пасажирів у транспортно-пересадочному вузлі. Під час аналізу об'єкта дослідження визначено, що на ділянках з виділеною смугою маршрутного пасажирського транспорту існує можливість усунення запізнення часу прибуття автобусів до транспортно-пересадочного вузла. Визначено, що основну функцію в забезпеченні синхронізації пересадки пасажирів здійснює регулярність руху, що вимірюється рівнем відхилення від планового моменту одночасного прибуття автобусів до транспортно-пересадочного вузла. Під час експериментальних досліджень визначено залежності зміни середнього часу очікування міжмаршрутної пересадки пасажирів для автобусних маршрутів № 32 та № 141 у транспортно-пересадочному вузлі «вул. Вокзальна» (м. Дніпро, Україна) в умовах впровадження виділених смуг руху.

Ключові слова: синхронізація розкладу руху, міський пасажирський транспорт, транспортно-пересадочний вузол, пересадка пасажирів, зупинний пункт.

Вступ

Автобусне сполучення є одним з основних та найбільш поширених видів міського пасажирського транспорту в багатьох країнах світу. Міські автобуси забезпечують задоволення транспортних потреб всіх верст населення та майже не мають інфраструктурних обмежень до їх використання на території міст. Сучасна організація автобусного сполучення в містах передбачає розроблення та впровадження низки організаційних заходів, що містять в собі такі процеси:

- удосконалення конструкції автобусів та поширення використання екологічно безпечних джерел енергії [1];
- впровадження швидкісних ліній автобусного сполучення в містах (BRT лінії міського сполучення) [2];
- удосконалення технологічних процесів обслуговування пасажирів у межах об'єктів транспортної інфраструктури [3];
- синхронізація розкладів руху на маршрутах [4];
- впровадження інтелектуальних систем управління рухом [5].

Головною метою вдосконалення роботи міського автобусного сполучення є скорочення часу пересування пасажирів. Досягнення цього певною мірою може бути забезпечено способом скорочення часу очіку-

вання пересадки пасажирів між маршрутами в транспортно-пересадочних вузлах (ТПВ). Для цього на автобусних маршрутах потрібно впроваджувати розклади руху, які синхронізовані один з одним за часовими параметрами перебування автобусів у ТПВ. Водночас для отримання гарантованого результату необхідним процесом є не лише розроблення синхронізованого розкладу, а також перевірка його результативності в реальних умовах руху автобусів вздовж вулично-дорожньої мережі (ВДМ) міста.

Аналіз публікацій

Вирішення проблеми комплексного розвитку взаємодії елементів маршрутного потоку в ТПВ та синхронізації руху маршрутів міського пасажирського транспорту (МПТ) досягається лише в умовах впровадження єдиної комплексної програми. Вона охоплює не тільки внутрішні технологічні процеси, але й зовнішні елементи (ВДМ, попит на перевезення, інформаційне забезпечення), що значною мірою впливають на результативність роботи рухомого складу.

У роботах [6–8] автори зазначають, що синхронізація руху на маршрутах МПТ в транспортній системі передбачає такі процеси:

- єдине планування, контроль та регулювання маршрутів МПТ у часі та просторі з

метою найбільш доцільного розподілення між ними пасажиропотоків за критеріями мінімуму сумарних витрат транспортного часу населення на пересування, максимуму експлуатаційної економічності й ефективності роботи транспортної мережі [6];

- облік особливостей експлуатації різних маршрутів МПТ та визначення для кожного з них оптимальної зони використання, яка б забезпечувала можливість отримання максимальних експлуатаційних показників транспортної роботи й якісних показників обслуговування пасажирів [7];

- визначення науково обґрунтованих пропорцій розвитку різних ліній МПТ та розподіл пасажиропотоків між ними [8].

Здійснений у роботі [6] аналіз сучасних підходів до синхронізації руху на автобусних маршрутах дозволяє обґрунтувати комплексність підходу який складається з таких елементів:

- формалізація критерію синхронізації через аналіз якості транспортного обслуговування пасажирів;

- комплексне дослідження розподілу пасажиропотоків вздовж маршрутів з урахуванням часових параметрів руху автобусів;

- спільне розроблення розкладів руху вздовж маршрутної мережі міста та її залежність від режимів роботи об'єктів тяжіння населення з огляду на особливості їх розселення;

- облік особливостей мережі та узгоджене розміщення зупинних пунктів вздовж маршрутів і в межах ТПВ;

- раціональний розподіл рухомого складу вздовж маршрутів та узгодження інтервалів руху за умови синхронізації руху;

- спільне нормування швидкостей руху та її узгодження на суміщених ділянках маршрутної мережі;

- розроблення комплексних заходів з підвищення безпеки руху, пропускної та провізної спроможності маршрутів.

Наведені напрями визначають значний спектр ключових аспектів, що впливають на планування синхронізації але регулярність розкладу руху в них не досліджувалося.

Ефективне функціонування МПТ, на думку авторів роботи [9], досягається в умовах взаємоузгодженого розвитку всіх її складових. Для цього потрібно впроваджувати заходи з визначення рівня впливу використання наявної транспортної інфраструктури на показники якості транспортного обслуговування населення. В умовах масового наси-

щення міст легковими автомобілями виникає та потребує вирішення проблема забезпечення регулярності руху на автобусних маршрутах.

У роботі [10] запропоновано використовувати спеціальні смуги як базовий інструмент для підвищення ефективності МПТ. У роботах, в яких досліджується питання організації виділених смуг МПТ [10–12], критерієм визначення доцільності такого рішення є техніко-експлуатаційні показники роботи МПТ та зміна умов руху загального транспортного потоку. Водночас рівень впливу виділених смуг на умови синхронізації руху автобусів через транспортно-пересадочні вузли в цих роботах не досліджувався.

Окремі аспекти рухових операцій вздовж маршрутів недостатньо вивчені, це обумовило визначення таких актуальних напрямів, які потребують дослідження:

- узгодження розкладів руху на суміжних маршрутах за часом одночасного перебування автобусів у ТПВ, що забезпечує пересадку пасажирів без очікування;

- впровадження виділених смуг МПТ, що створює умови для забезпечення надійності розкладу руху та робить можливим усунення відхилень прибуття автобусів до ТПВ.

Мета та постановка завдання

Метою роботи є аналіз впливу умов руху автобусів вздовж виділених смуг МПТ на результативність синхронізації розкладу руху, що визначається скороченням часу пересадки пасажирів у ТПВ. Для досягнення цієї необхідно вирішити такі завдання:

- розробити структурну модель визначення тривалості пересадки пасажирів на основі обліку часових параметрів руху автобусів вздовж мережі;

- проаналізувати типовий режим руху автобусів вздовж виділених смуг МПТ щодо регулярності прибуття в ТПВ та результативності синхронізації розкладу;

- провести експериментальні дослідження зміни часових параметрів пересадки пасажирів для різних умов руху автобусів вздовж ВДМ міста.

Виклад основного матеріалу

Основне призначення синхронізації розкладу руху МПТ полягає в забезпеченні скорочення часу пересадки пасажирів між маршрутами. Це реалізується способом встановлення однакових моментів часу прибуття автобусів до відповідних зупинних пунктів

ТПВ. Одночасне знаходження автобусів в ТПВ забезпечує можливість пересадки пасажирів між маршрутами без очікування. Процес синхронізації руху можна навести як типову топологічну схему взаємодії двох радіальних автобусних маршрутів (рис. 1).

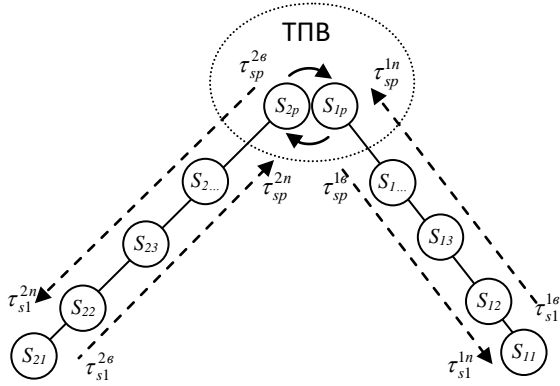


Рис. 1. Типова топологічна схема синхронізації руху 2 маршрутів

До складу наведеної мережі належить $S_n = \{S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1p}, S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2p}\}$ зупинних пунктів (ЗП), в яких є обсяги відправлення $Q_s^e = \{q_{s11}^e, \dots, q_{s1(p-1)}^e, q_{s21}^e, \dots, q_{s2(p-1)}^e\}$ та прибуття $Q_s^n = \{q_{s12}^n, \dots, q_{s1n}^n, q_{s22}^n, \dots, q_{s2n}^n\}$ пасажирів. Маршрути мають ЗП (S_{1p}, S_{2p}), що розташовані в межах ТПВ, де здійснюються міжмаршрутні пересадки пасажирів. Обсяг пересадки визначається конфігурацією маршрутної мережі та пасажирообміном. Протягом періоду (T_n) на маршрутах здійснюється $N_{p1} = N_{p2}$ оборотних рейсів з інтервалом I_p , що можуть бути синхронізовані за умовами провізних можливостей на мінімально завантаженому маршруті. Кожен окремий суміжний рейс $i_p \in N_{p1}, N_{p2}$ визначається часовими моментами: подачі автобуса до початкового ЗП ($\tau_{s1}^e(i_p)$), прибуття до ЗП ТПВ ($\tau_{sp}^n(i_p)$), відправлення з ЗП ТПВ у зворотній рейс ($\tau_{sp}^e(i_p)$), прибуття до ЗП ($\tau_{s1}^n(i_p)$). Можливий час відправлення в зворотному напрямку $\tau_{sp}^e(i_p)$ визначається моментом $\tau_{sp}^n(i_p)$, тривалістю висадки пасажирів (t_{sp}^e) та технологічного простою (t_{sp}^m). Тривалість технологічного простою визначається часом здійснення операцій на кінцевому ЗП (t_{sp}^o)

та додатковим простоем (Δt_{sp}^c) для очікування пасажирів, що може бути застосований в разі запізнення прибуття суміжного маршруту. Момент відправлення з ЗП ТПВ в зворотному напрямку в цьому випадку становить

$$\tau_{sp}^e(i_p) = \tau_{sp}^n(i_p) + t_{sp}^e + t_{sp}^o + \Delta t_{sp}^c. \quad (1)$$

Впровадження Δt_{sp}^c , хоча і є одним зі способів забезпечення умов синхронізації міжмаршрутної пересадки, але призводить до збільшення часу очікування пасажирів. Тому цей час потрібно мінімізувати, а умови синхронізації мають забезпечуватися раціональним плануванням часу відправлення з початкового ЗП та регулярністю прибуття до ТПВ. Момент прибуття до ТПВ визначається часом подачі автобуса на початковий ЗП, тривалістю рухових операцій та простоем на проміжних ЗП під час рейсу:

$$\tau_{sp}^n(i_p) = \tau_{s1}^e(i_p) + \sum_{i=1}^{S_p-1} t_{si}^n + \sum_{j=1}^{S_p-1} t_{lj}^p, \quad (2)$$

де t_{si}^n – час простою на i -му ЗП, хв; t_{lj}^p – час руху вздовж i -го перегону, хв; s_p – кількість ЗП на маршруті.

Час відправлення автобуса з початкового ЗП визначається з огляду на вимоги синхронізації пересадки в ТПВ. Процедура визначення моменту відправлення автобусів з початкового ЗП за умов забезпечення синхронізації пересадки наведена на рис. 2.

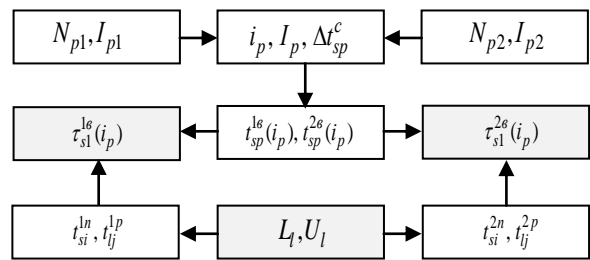


Рис. 2. Етапи визначення часу відправлення з початкового ЗП

На основі значень пасажиропотоку та техніко-експлуатаційних параметрів за кожним маршрутом визначається потрібна кількість рейсів N_{p1}, N_{p2} у період T_n . Вибирається мінімальне значення рейсів, що визначає їхню кількість для синхронізації i_p , інтервал I_p та допустиме значення Δt_{sp}^c . Ця інформа-

ція дозволяє визначити сукупність моментів $t_{sp}^{1g}(i_p), t_{sp}^{2g}(i_p)$, що задовольняють умовам синхронізації. На основі часу тривалості руху вздовж перегонів та простою на ЗП визначається доцільний час відправлення з початкового ЗП. Водночас варто зазначити, що величини t_{si}^n, t_{ij}^p не є сталими в часі та значною мірою схильні до впливу різноманітних чинників. Ступінь стабілізації цих величин залежить від рівня організованості роботи МПТ. Існує два базові варіанти організації: рух автобусів у складних дорожніх умовах без дотримання розкладу та рух в умовах виділених смуг МПТ з вільними умовами. На рис. 3 та 4 наведено розподіл значень тривалості рейсу для цих варіантів.

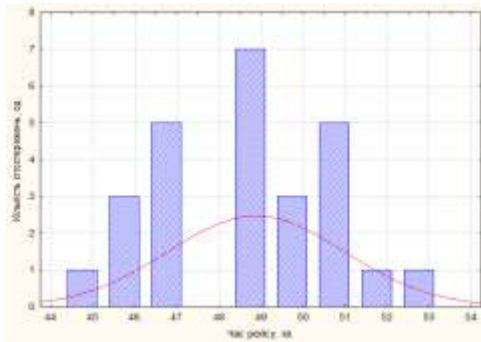


Рис. 3. Розподіл часу рейсу на маршруті № 32 (м. Дніпро)

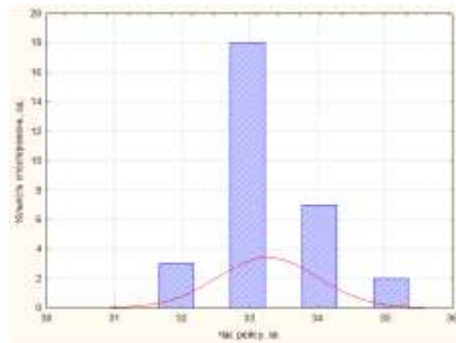


Рис. 4. Розподіл часу рейсу на маршруті № 32 (м. Любек)

На рис. 3 наведено результати розподілу часу рейсу для маршруту № 32 «вул. Левановського – пл. Вокзальна» (м. Дніпро, Україна). Траса маршруту проходить вздовж центральної частини міста та має декілька ділянок з ускладненими умовами руху. У цьому випадку водії не можуть забезпечувати дотримання розкладу, що робить рух вздовж маршруту нестабільним. Про це свідчить розподіл часу рейсу. Отримані значен-

ня спостережень не дають змогу підтвердити наявність нормального закону розподілу, отже, вони відповідають флуктуації руху. На маршруті № 32 «Lübeck Hirtenbergweg – Lübeck Zob» (м. Любек, Німеччина) спостерігаються умови вільного руху, а на під'їзді до кінцевого ЗП є ділянки з виділеною смугою для МПТ. Таким чином, це дає можливість для забезпечення водієм під час руху дотримання розкладу та скорочення діапазону можливого прибуття до кінцевого ЗП. Основним елементом забезпечення узгодження прибуття автобусів до ТПВ є коригування часу руху вздовж ділянок маршруту. Це реалізується безпосередньо водієм автобуса способом нагону або уповільнення руху. Фактична можливість реалізації таких заходів залежить від довжини ділянок маршруту L_i та умов руху вздовж них U_i . Умови руху вздовж ділянок можна проаналізувати щодо зручності керування автобусом для дотримання своєчасності прибуття в ТПВ.

Критерій визначення ефективності синхронізації відтворює можливі середні (в період T_n) витрати часу окремих пасажиром для здійснення пересадки:

$$T_o^n = \frac{\sum_{i_p=1}^{N_{p1}} T_o^{x-y}(i_p) + \sum_{i_p=1}^{N_{p2}} T_o^{y-x}(i_p)}{N_{p1} + N_{p2}}, \quad (3)$$

де $T_o^{x-y}(i_p), T_o^{y-x}(i_p)$ – час пересадки між маршрутами $x - y$ та $y - x$, хв.

$$T_o^{x-y}(i_p) = \begin{cases} \tau_{sp}^{xg}(i_p) - \tau_{sp}^{yn}(i_p), & \text{при } \tau_{sp}^{yg} \geq \tau_{sp}^{xn} \\ \tau_{sp}^{yg}(i_p + 1) - \tau_{sp}^{xn}(i_p), & \text{при } \tau_{sp}^{yg} < \tau_{sp}^{xn} \end{cases}. \quad (4)$$

В умовах синхронізації розкладу руху її результативність залежить від рівня зручності руху на прилеглих до ТПВ ділянках мережі. Цей зв'язок можна записати як функцію $t_o^n(i_p) = f(L_i, U_i, \Delta t_{sp}^c)$. Підвищення рівня зручності керування автобусом досягається впровадженням виділених смуг МПТ на ділянках мережі, насамперед прилеглих до ТПВ. Для дослідження типу впливу виділених смуг МПТ на фактичну синхронізацію розкладу доцільно використати імітаційне моделювання. У межах імітаційного моделювання спочатку на основі статистичних спостережень визначаються параметри зміни руху вздовж ділянок ВДМ для виділених

смуг та враховується можливість ліквідації відхилення прибуття до ТПВ на цих ділянках. Управління швидкістю руху автобусами на ділянках мережі з виділеними смугами МПТ має мету забезпечити надійність дотримання розкладу руху на маршруті та є одним з головних аспектів, що визначає умови синхронізації міжмаршрутної пересадки пасажирів у ТПВ. В умовах моделювання руху вздовж виділених смуг важливу функцію здійснює визначення закономірностей формування швидкісного режиму. Згідно з результатами аналізу зміни швидкості автобусів на маршруті № 32 (м. Любек, Німеччина), існує типова ситуація, яка наведена на рис. 5.

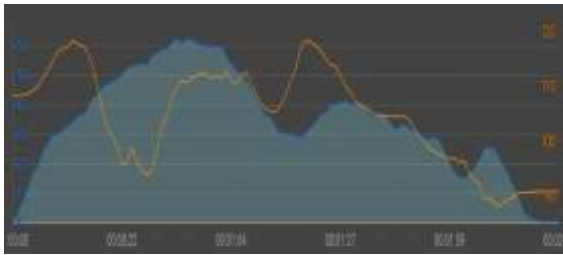


Рис. 5. Зміна швидкості руху вздовж виділеної ділянки МПТ

Аналізуючи цей графік, можна дійти висновку, що залежно від поточної ситуації водій використовує різні прийоми керування автобусом. Так, на графіку наведена ситуація, коли автобус спочатку поступово розвиває швидкість до 60 км/год, а потім стабілізує її на рівні 40 км/год. Це обумовлено тим, що необхідно дотриматись графіка прибуття до ЗП і є потреба в уповільненні руху наприкінці ділянки. У цьому випадку тривалість проїзду перегону маршруту може бути визначена згідно з типовим графіком руху, що наведений на рис. 6.

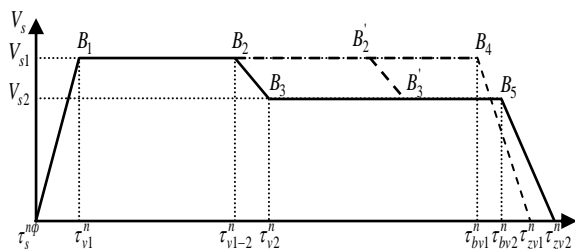


Рис. 6. Типовий графік руху автобуса вздовж виділеної ділянки

Рух автобуса вздовж перегону починається в момент часу τ_s^n . В інтервалі $\tau_s^{n\phi} - \tau_s^n$ водій прискорює автобус до рівня сталої

швидкості V_{s1} . Значення V_{s1} може бути визначено обмеженнями на максимальну швидкість руху або в процесі статистичного оброблення результатів натурних спостережень. У діапазоні $\tau_{v1}^n - \tau_{v1-2}^n$ здійснюється рух автобуса зі сталою швидкістю V_{s1} . У точці B_2 водій може прийняти рішення щодо зміни швидкісного режиму. У разі випередження графіка прибуття автобуса до ЗП водій може пригальмувати та перейти на сталу швидкість V_{s2} . Якщо ж він рухається з запізненням графіка, то автобус продовжить рух зі сталою швидкістю V_{s1} до точки B_4 або B_2' . Від швидкісного режиму в точці B_2 буде залежати час прибуття автобуса до ЗП. Водночас варто зазначити, що скорочення часу руху вздовж перегону способом прибуття автобуса в момент τ_{zv1}^n є доцільним в разі відставання від графіка руху. Саме наявність умови, коли фактичний час відправлення автобуса з попереднього ЗП $\tau_s^{n\phi}$ відрізняється від планового τ_s^{nn} , призводить до того, що водій приймає рішення про скорочення часу руху на перегоні та прибуття автобуса відбувається в момент τ_{zv1}^n . У разі, якщо рух відбувається за розкладом, то водій буде прагнути забезпечити умову, коли фактичне прибуття до ЗП τ_{zv2}^n буде дорівнювати плановому часу відправлення автобуса з ЗП до наступного перегону маршруту $\tau_{s+1}^{n\phi}$ з оглядом на тривалість простою на ЗП:

$$\tau_{zv1,2}^n \rightarrow \tau_{s+1}^{nn} - t_{s+1}^n, \quad (5)$$

де τ_{s+1}^{nn} – плановий момент часу відправлення автобуса з ЗП $s+1$, хв; t_{s+1}^n – тривалість простою в ЗП $s+1$, хв.

У разі значного запізнення відправлення з ЗП $\tau_s^{n\phi} > \tau_s^{nn}$, через який неможливо повною мірою ліквідувати запізнення завдяки нагону на перегоні, час проїзду становить

$$t_{lj}^p = t_p + 60 \frac{l_n - l_p - l_y}{V_{s1}} + t_y, \quad (6)$$

де t_p – час маневрування та розгону автобуса до сталої швидкості V_{s1} , хв; t_y – час уповільнення автобуса та маневрування під час заїзду до ЗП, хв; l_n – довжина перегону, км;

l_p – довжина ділянки розгону, км; l_y – довжина ділянки уповільнення, км.

Рівень значення запізнення визначається можливістю його ліквідації за умови руху з максимально допустимою швидкістю. Якщо значення можливого нагону буде менше за запізнення, то в умовах вільного руху водій буде використовувати максимальний швидкісний режим вздовж всього перегону. Значення часу можливого нагону

$$\Delta t_n = \tau_{s+1}^{nn} - t_{s+1}^n - \tau_s^{n\phi} - t_{lj}^p. \quad (7)$$

Умову для застосування максимальної швидкості на всьому перегоні можна записати так:

$$\Delta t_n \leq \tau_s^{n\phi} - \tau_s^{nn}. \quad (8)$$

Якщо запізнення від розкладу руху може бути ліквідовано завдяки нагону ($\Delta t_n > \tau_s^{n\phi} - \tau_s^{nn}$) або відставання відсутнє ($\tau_s^{n\phi} = \tau_s^{nn}$), тоді під час руху вздовж перегону використовується два швидкісні режими руху V_{s1} та V_{s2} .

Водночас варто зазначити, що водій може використовувати в цьому випадку два підходи до керування автобусом: вибирає момент переходу між швидкостями відповідно до умови прибуття до ЗП за графіком або керує автобусом відповідно до умови недопущення запізнення прибуття до ЗП, тоді в цьому випадку можливе прибуття з деяким випередженням.

Аналіз здійснення рухових операцій демонструє, що другий підхід використовується не часто, він є визначальним для періодів часу, коли спостерігається низький рівень попиту та завантаження рухом ВДМ. Тому як основний будемо використовувати перший підхід. У цьому випадку час руху вздовж перегону визначається як різниця

$$t_{lj}^p = \tau_{s+1}^{nn} - t_{s+1}^n - \tau_s^{n\phi}. \quad (9)$$

Використовуючи в (1) значення часу руху вздовж перегону (9), можна визначити момент прибуття автобуса до ТПВ.

Під час експериментальних досліджень здійснено моделювання руху автобусів для маршрутів № 32 та № 141 (м. Дніпро, Україна). Ці маршрути мають територіальну ув'язку в ТПВ «вул. Вокзальна». На рис. 7

наведено схему маршрутів та ділянок виділених смуг для МПТ.



Рис. 7. Схема маршрутів № 32 та № 141 (м. Дніпро, Україна)

Було запропоновано визначити вплив ділянок з виділеними смугами для МПТ (вул. 128 Бригади Тероборони, пр. С. Нігояна, вул. С. Бандери, вул. Лесі Українки, пр. О. Поля). На основі обстеження маршрутів визначено базові параметри руху вздовж перегонів та час простою на ЗП. У табл. 1 наведено значення параметрів, що використані під час моделювання.

Таблиця 1 – Параметри моделювання складових тривалості рейсу

Параметр	Маршрут	
	32	141
Довжина, км	14,4	27,2
Довжина ділянки виділених смуг МПТ, км	6,7	1,8
Кількість ЗП	32	42
Кількість рейсів у період з 7 ⁰⁰ до 9 ⁰⁰ години	8	8
Час простою на ЗП, хв	0,4–1	0,3–0,9
Технічна швидкість (без виділеної смуги), км/год	26,1–33,2	28,2–34,5
Технічна швидкість (з виділеною смугою), км/год	35,4–40,2	
Час маневрування та розгону автобуса, хв	0,25–0,5	
Час уповільнення та маневрування автобуса, хв	0,2–0,33	

Для визначення моментів прибуття автобусів до ТПВ здійснена низка експериментів з використанням комп'ютерної моделі. Етапи реалізації імітаційної моделі наведені у вигляді алгоритму на рис. 8.

Основною частиною алгоритму є реалізація процедури Traffic_rout, що визначає фактичне прибуття до кожного ЗП. Реалізація процедури здійснена в середовищі VBA.

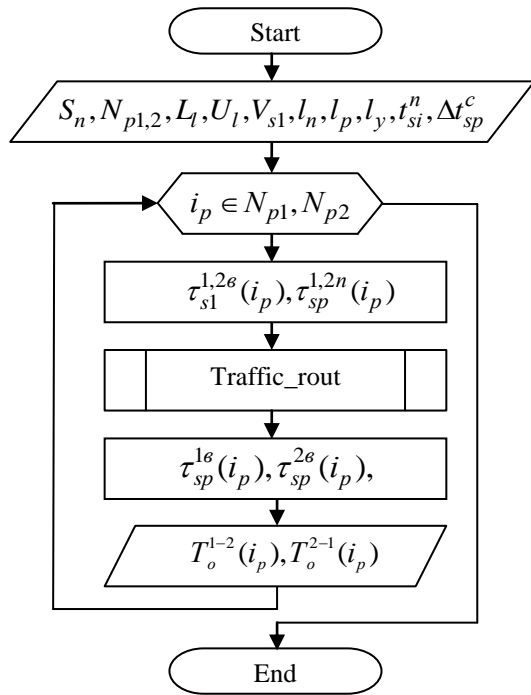


Рис. 8. Алгоритм моделювання

На рис. 9 наведений базовий код розрахункової процедури Traffic_rout:

```

0: Dim V_s, l_n, \tau_s^{nm}, t_s^m .
1: For i = 1 To S_p
2: Rnd t_s^n, t_p, t_y
3: If \tau_i^{n\phi} \le \tau_i^{nm}, \tau_i^{n\phi} = \tau_i^{nm} . Else \tau_i^{n\phi} = \tau_{i-1}^{n\phi} + t_{i-(i+1)}^p ,
4: Next i
    
```

Рис. 9. Базовий код процедури Traffic_rout

На рис. 10 для маршруту № 32 наведено зміну відхилення моментів прибуття автобуса до ЗП від планового розкладу, отриманого для одного окремого експерименту.

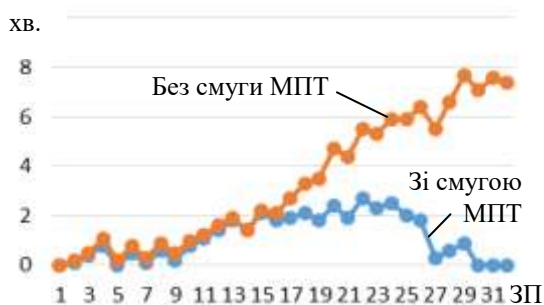


Рис. 10. Зміна відхилення прибуття автобуса до ЗП (маршрут № 32)

Відповідно до графіка зміни відхилення прибуття автобуса до ЗП, впровадження смуг

МПТ робить можливим ліквідацію запізнення прибуття до ТПВ. На ЗП № 17 (початок виділеної смуги) спостерігається поступове усунення запізнення руху з 2 до 0 хв. Такі умови створюють можливість підвищення регулярності руху та забезпечення синхронізації пересадки в ТПВ. За відсутності виділених смуг рівень запізнення після ЗП № 17 починає збільшуватися, що обумовлено складними умовами руху в центральній частині міста.

У процесі імітаційного моделювання отримано по 80 значень функції відклику (часу пересадки пасажирів) для різних умов руху автобусів вздовж ділянок мережі. У табл. 2 наведено результати моделювання.

Таблиця 2 – Результати моделювання параметрів синхронізації пересадки пасажирів

Параметр	Без смуги МПТ	Зі смугою МПТ
Відхилення прибуття автобусів до ТПВ, хв.	3–9	0–2
Питома вага рейсів з відхиленням прибуття більше ніж $\Delta t_{sp}^c = 2$ хв, %	92,5	0
Середній час очікування пересадки T_o^n ($\Delta t_{sp}^c = 2$ хв) для 8 рейсів, хв	7,6	2,7

На рис. 11 наведено зміну часу очікування пересадки T_o^n залежно від міжрейсового простору в ТПВ Δt_{sp}^c .

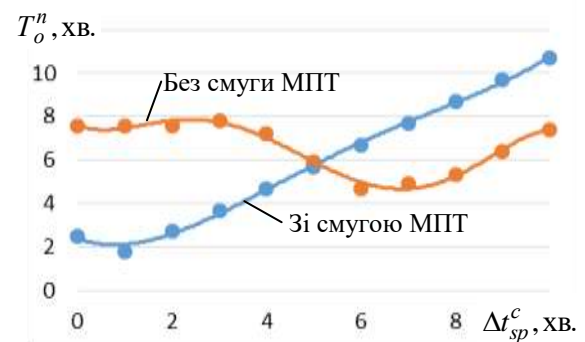


Рис. 11. Зміна часу очікування пересадки

Аналізуючи отримані залежності зміни середнього часу очікування пересадки в ТПВ в умовах впровадження виділених смуг можна встановити наявність певного характеристичного зв'язку.

Без впровадження виділених смуг спостерігається ситуація, за якої кожен рейс має

відхилення від планового прибуття в межах від 3 до 9 хв. Такі запізнення призводять до того, що фактичний час прибуття автобусів змінюється та значною мірою збільшується випадковість процесу міжмаршрутної пересадки. Скорочення часу очікування за таких умов можливе лише в разі збільшення додаткового простою автобусів у ТПВ з метою очікування суміжного маршруту. Збільшення часу очікування з 1 до 7 хв дає можливість скоротити час очікування пересадки з 8 до 4,5 хв (на 43,7 %). Однак це призведе до збільшення часу обороту, що негативно вплине на продуктивність роботи рухомого складу. Більш дієвим способом є забезпечення регулярності прибуття в умовах впровадження виділених смуг МПТ. Для всіх експериментів отримано відхилення часу прибуття до ТПВ з запізненням не більше ніж 2 хв. Впровадження додаткового простою автобусів у ТПВ в межах 1 хв призводить до того, що середній час очікування пересадки буде складати 2,5 хв, а в разі простою в 2 хв скоротиться до 1,7 хв. Збільшення міжрейсового часу простою автобусів призведе до збільшення середнього часу пересадки. Це пояснюється тим, що в діапазоні до 2 хв здійснюється прибуття всіх рейсів та подальше перебування автобусів у ТПВ не доцільне. Якщо простої тривають менше ніж 2 хв, виникають окремі ситуації, коли прибуття автобуса може відбуватися після відправлення суміжного рейсу, тоді пасажир вимушений очікувати наступного рейсу, що значною мірою збільшує час очікування. Порівнюючи варіанти організації руху маршрутами, можна дійти висновку, що впровадження виділених смуг руху дає можливість скоротити час очікування пересадки пасажирів у ТПВ з 4,7 до 1,8 хв (на 61,7 %).

Висновки

Одним з основних завдань покращення роботи МПТ є синхронізація розкладу руху автобусів через ТПВ, що є ефективним способом для скорочення часу пресування пасажирів. Створення умов для забезпечення цього процесу призводить до підвищення регулярності руху та якості транспортного обслуговування пасажирів.

Під час аналізу елементів об'єкта дослідження було визначено, що основними елементами забезпечення синхронізації міжмаршрутної пересадки є своєчасність прибуття та тривалість міжрейсового простою автобусів до ТПВ. Визначено, що створення віль-

них умов руху автобусів на ділянках маршруту через впровадження виділених смуг МПТ здійснює в цьому процесі критично важливу функцію. На основі аналізу типового графіка руху автобуса вздовж перегону маршруту з виділеною смугою МПТ визначено, що існують реальні можливості для ліквідації часу запізнення та підвищення рівня своєчасності прибуття до ТПВ.

За результатами моделювання руху автобусів на маршрутах № 32 та № 141 (м. Дніпро, Україна) було визначено, що в умовах руху вздовж виділених смуг час відхилення прибуття до ТПВ від планового буде складати не більше ніж 2 хв, а без виділених смуг – від 3 до 9 хв. Наявність значного відхилення часу прибуття до ТПВ в умовах руху без виділених смуг значною мірою унеможливує синхронізацію міжмаршрутної пересадки та призводить до збільшення часу очікування пасажирів. За таких умов для скорочення часу очікування пересадки потрібно використати додатковий міжрейсовий простій, тривалістю 7 хв. Це дає можливим скоротити середній час очікування пересадки пасажирів до 4,5 хв, але призведе до збільшення часу оборотного рейсу та зниження продуктивності роботи рухомого складу. Впровадження виділених смуг МПТ на ділянках маршрутів дозволяє скоротити час очікування пересадки пасажирів у ТПВ до 1,8 хв. Водночас час додаткового простою в ТПВ не має перевищувати 2 хв. Аналізуючи отримані результати, можна дійти висновку, що впровадження виділених смуг МПТ на ділянках перед ТПВ дозволяють отримати скорочення часу очікування пересадки пасажирів та забезпечити реальні умови для синхронізації розкладу руху на маршрутах МПТ.

Література

1. Wenz K. P., Serrano-Guerrero X., Barragán-Escandón A., González L. G., Clairand J. M. Route prioritization of urban public transportation from conventional to electric buses: a new methodology and a study of case in an intermediate city of Ecuador. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 148. 111215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111215>.
2. Zhang M., Yen B.T. The impact of Bus Rapid Transit (BRT) on land and property values: a meta-analysis. *Land Use Policy*. 2020. Vol. 96. P. 104–126. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104684>.
3. Markevych A., Vdovychenko V., Ivanov I. Influence of bus service downtime in the transport interchange on the duration of inter-route transfer of passengers. *Technology Audit and Production*

- Reserves*. 2021. №3/2(59). 6–10. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.231465>.
4. Liu T., Cats O., Gkiotsalitis K. A review of public transport transfer coordination at the tactical planning phase. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021. Vol. 133. 103450. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103450>.
 5. Kuo Y. H., Leung J. M., Yan Y. Public transport for smart cities: recent innovations and future challenges. *European Journal of Operational Research*. 2023. Vol. 306(3). 1001–1026. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.06.057>.
 6. Gavriilidou A., Cats O. Reconciling transfer synchronization and service regularity: Real-time control strategies using passenger data. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2019. Vol. 15(2), 215–243. <https://doi.org/10.1080/23249935.2018.1458757>.
 7. Ibarra-Rojas O. J., Munoz J. C., Giesen R., Knapp P. Integrating frequency setting, timetabling, and route assignment to synchronize transit lines. *Journal of Advanced Transportation*. 2019. 1–13. <https://doi.org/10.1155/2019/9408595>.
 8. Ceder A. Urban mobility and public transport: future perspectives and review. *International Journal of Urban Sciences*. 2021. Vol. 25(4). 455–479. <https://doi.org/10.1080/12265934.2020.1799846>.
 9. Проблеми та перспективи розвитку міських пасажирських перевезень / Є. М. Шапенко та ін. In *The 28th International scientific and practical conference "Science and development of methods for solving modern problems" July 18–21, 2023, Melbourne, Australia. International Science Group*. 2023. 226–228.
 10. Vdovychenko V. O., Ivanov I. E., Pidlubnyi S. Yu., Vasiliev M. K. Assessment of priority movement impact for urban public passenger transport on the quality of passenger service. *Automobile transport*. 2023. №52 p. 54–63. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2023.52.0.06>.
 11. Bayrak M., Guler S. I. Optimization of dedicated bus lane location on a transportation network while accounting for traffic dynamics. *Public Transport*. 2021. Vol. 13. 325–347. <https://doi.org/10.1007/s12469-021-00269-x>.
 12. Russo A., Adler M. W., Van Ommeren J. N. Dedicated bus lanes, bus speed and traffic congestion in Rome. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2022. Vol. 160. 298–310. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.04.001>.
 13. Zhang, M., Yen, B.T. (2020). The impact of Bus Rapid Transit (BRT) on land and property values: a meta-analysis. *Land Use Policy*. Vol. 96. P. 104–126. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104684>.
 14. Markevych, A., Vdovychenko, V., Ivanov, I. (2021). Influence of bus service downtime in the transport interchange on the duration of inter-route transfer of passengers. *Technology Audit and Production Reserves*. №3/2(59). 6–10. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.231465>.
 15. Liu, T., Cats, O., Gkiotsalitis, K. (2021). A review of public transport transfer coordination at the tactical planning phase. *Transportation Research Part C: emerging Technologies*. Vol. 133. 103450. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103450>.
 16. Kuo, Y. H., Leung, J. M., Yan, Y. (2023). Public transport for smart cities: recent innovations and future challenges. *European Journal of Operational Research*. Vol. 306(3). 1001–1026. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.06.057>.
 17. Gavriilidou, A., Cats, O. (2019). Reconciling transfer synchronization and service regularity: Real-time control strategies using passenger data. *Transportmetrica A: transport Science*. Vol. 15(2). 215–243. <https://doi.org/10.1080/23249935.2018.1458757>.
 18. Ibarra-Rojas, O. J., Munoz, J. C., Giesen, R., Knapp, P. (2019). Integrating frequency setting, timetabling, and route assignment to synchronize transit lines. *Journal of Advanced Transportation*. 1–13. <https://doi.org/10.1155/2019/9408595>.
 19. Ceder, A. (2021). Urban mobility and public transport: future perspectives and review. *International Journal of Urban Sciences*. Vol. 25(4). 455–479. <https://doi.org/10.1080/12265934.2020.1799846>.
 20. Shapenko, Y., Gulchak, O., Kotova, S., Bilonoh, O., Yaroshevskyy, V. (2023). Research of the existing problems of the organization of urban passenger transportation. In *The 28th International scientific and practical conference "Science and development of methods for solving modern problems" July 18–21, 2023, Melbourne, Australia. International Science Group*. 226–228 [in Ukrainian].
 21. Vdovychenko, V. O., Ivanov, I. E., Pidlubnyi, S. Yu., Vasiliev, M. K. (2023). Assessment of priority movement impact for urban public passenger transport on the quality of passenger service. *Automobile transport*. № 52 Pp. 54–63. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2023.52.0.06>.
 22. Bayrak, M., Guler, S.I. (2021). Optimization of dedicated bus lane location on a transportation network while accounting for traffic dynamics. *Public Transport*. Vol. 13. 325–347. <https://doi.org/10.1007/s12469-021-00269-x>.

References

1. Wenz, K. P., Serrano-Guerrero, X., Barragán-Escandón, A., González, L. G., Clairand, J. M. (2021). Route prioritization of urban public transportation from conventional to electric buses: a new methodology and a study of case in an intermediate city of Ecuador. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 148, 111215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111215>.
2. Bayrak, M., Guler, S.I. (2021). Optimization of dedicated bus lane location on a transportation network while accounting for traffic dynamics. *Public Transport*. Vol. 13. 325–347. <https://doi.org/10.1007/s12469-021-00269-x>.

12. Russo, A., Adler, M. W., Van Ommeren, J. N. (2022). Dedicated bus lanes, bus speed and traffic congestion in Rome. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 160. 298–310. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.04.001>

Вдовиченко Володимир Олексійович¹, д.т.н., проф. каф. транспортних технологій, vval2301@gmail.com, тел. +38050-403-17-10, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2746-8175>
Підлубний Сергій Юрійович¹, аспірант каф. транспортних технологій, pidlubnyi_s@ukr.net, тел. +38050-362-40-42, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4840-7363>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

The effect of dedicated lanes of urban passenger transport on the conditions of synchronization of inter-route passenger transfers

Abstract. Problem. The work is aimed at studying the problematic issue of reducing the waiting time for a transfer at a transport interchange hub. Due to the effect of external factors, the synchronization of the arrival schedule of buses at the transport interchange hub becomes practically impossible, which leads to an increase in the time that the passengers spend for a transfer. The solution to this problem is proposed through the introduction of dedicated traffic lanes on the approach to the transport interchange hub, within which it is possible to eliminate traffic deviations from the schedule. **Goal.** The purpose of the work is to establish the characteristic effect of the conditions of bus traffic on the designated lanes on the effectiveness of the traffic schedule synchronization, which is determined by the reduction of the passengers' transfer time at the transport interchange hub. **Methodology.** The methodological basis for the analysis of the impact of bus traffic conditions on the designated lanes is a structural model that reflects the relationship between the high-speed mode and the time of deviation of arrival at the transport interchange hub. The evaluation of the effectiveness of the traffic schedule synchronization on the routes is carried out on the basis of the time parameters of bus traffic and the accounting of additional inter-journey idle time at stops. Based on the analysis of the traffic conditions along the route with a dedicated lane, an algorithm has been developed to determine the actual time of the bus's arrival at the stopping points of the

route. **Results.** It was established that the deviation of the arrival time of buses is critically important for the effective organization of the synchronization of inter-route transfers of passengers. Accounting for the key traffic factors in the conditions of the dedicated lane, such as the length of the dedicated lane section and the maximum speed of steady traffic, makes it possible to increase the accuracy of modeling the time parameters of the arrival of buses at the transport interchange hub. **Originality.** It is proposed to use the introduction of areas with dedicated traffic lanes as a basic element of effect on increasing the efficiency of synchronization of inter-route passenger transfers. The obtained regularities reproduce the effect of the deviation of bus arrivals on the change in the waiting time of an inter-route transfer. It was determined that the duration of inter-journey downtime can be reduced by increasing the regularity of traffic on the route. **Practical value.** According to the results of experimental studies, the regularities of changes in the average waiting time for passengers to transfer in the transport interchange hub "Str. Vokzalna" between routes No. 32 and No. 141 (Dnipro, Ukraine) were established. It was proven expedient to introduce dedicated bus lanes on the approach to the 6.7 km long and 1.8 km long transport interchange hub. The implementation of such measures makes it possible to reduce the deviation of bus arrivals from the synchronized schedule from 9 minutes to 2 minutes. This makes it possible to reduce the transfer time of passengers from 4.7 minutes to 1.8 minutes (by 61.7 %) and reduce the inter-journey idle time from 7 minutes to 2 minutes, which has a positive effect on increasing the productivity of buses and the quality of passenger service.

Key words: synchronization of the traffic schedule, city passenger transport, transport and transfer hub, transfer of passengers, stop point.

Volodymyr Vdovychenko, Doctor of technical sciences, Professor, Department of Transport Technology, vval2301@gmail.com, +38 050-403-17-10, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2746-8175>
Serhii Pidlubnyi¹, Postgraduate Student, Department of Transport Technology, pidlubnyi_s@ukr.net, тел. +38050-362-40-42, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4840-7363>

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslav Mudry str., Kharkiv, Ukraine, 61002.