

МАНЕВРЕНІСТЬ МЕТРОБУСІВ¹ Національний транспортний університет² Вінницький національний технічний університет

Проаналізовано переваги і недоліки системи BRT (Bus rapid transit), яка за деякими параметрами (зокрема, за швидкістю) порівняна з системами легкорельсового транспорту (швидкісного трамвая). Показано, що при реалізації системи BRT виникає ряд труднощів, пов'язаних, перш за все, з прокладенням траси. Визначено максимальне зміщення траєкторії причепів щодо траєкторії автобуса для дво- і триланкових метробусів, а відповідно і їх габаритна смуга руху. Для триланкових метробусів ГСР складає 9,9 м, що значно перевищує допустиму за DIRECTIVE 2002/7/ЕС. Зменшити ГСР метробуса можна за рахунок керованих коліс (осі) причепа.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Швидкісний автобус, також Метробус (англ. Bus rapid transit, BRT) – спосіб організації автобусного (або тролейбусного) сполучення, що відрізняється вищими експлуатаційними характеристиками у порівнянні зі звичайними автобусними маршрутами (швидкість, надійність, провізна здатність). За деякими параметрами (зокрема, за швидкістю) системи швидкісного автобусного транспорту порівнянні з системами легкорельсового транспорту (швидкісного трамвая) [1].

BRT є результатом розвитку мережі автобусного громадського транспорту. Порівняно з метро цей проект має очевидні перевагами: менша вартість створення мережі, менша вартість рухомого складу, мобільність та інші [2].

Розглянемо відмінність BRT від звичайної автобусної мережі. По-перше, в повноцінному комплексному підході. Жоден елемент системи не може існувати окремо один від одного. Все прораховано і розплановано заздалегідь і дуже ретельно. Крім того, основна відмінність BRT в тому, що всі маршрути максимально ізольовані від доріг загального користування, а в тих окремих випадках, коли це неможливо зробити, автобуси, що входять в систему, мають значну перевагу над іншими транспортними одиницями.

У цій системі все спрямовано на збільшення швидкості руху. Цьому сприяє не тільки ізоляція від заторів на основній дорожній мережі, але і, здавалося б, такі незначні аспекти, як продаж і валідація квитків до посадки в автобус, двері і посадковий пандус збігаються за висотою, зручна і зрозуміла навігація і багато ін. [3].

Проект BRT припускає рух автобусів по спеціально виділеним і часто обгородженим смугам. Головною перевагою метробуса є його повна ізолюваність на дорозі від решти видів транспорту. Як засіб руху вибираються зчленовані автобуси останнього покоління, оснащені двигунами до 300 к. с. При цьому, як в метро, в салонах метробусів віддається перевага місцям для стояння. Завдяки цьому, тільки один зчленований автобус перевозить до 200 пасажирів [4].

Метробус рекордної місткості презентували на виставці Busworld Turkey 2016 в Стамбулі. Тут світову прем'єру відсвяткував наддовгий трисекційний метробус марки АКІА, призначений для перевезення майже трьох сотень пасажирів. Метробус АКІА Ultra LF25 має довжину 25 метрів і може перевозити рекордне в цьому класі число пасажирів – 290. Місць для сидіння при цьому всього нічого – 29. Ця машина розроблена спеціально для виділеної лінії швидкісного автобусного сполучення BRT, що успішно функціонує сьогодні у низці найбільших міст світу, у тому числі і в Стамбулі. Технічні характеристики метробусу поки що немає – відомо лише, що він оснащується турбодизельним двигуном Mercedes-Benz екологічного стандарту Євро 6.

Наддовгий метробус Ultra LF25 може також випускатися не тільки з дизелем, але і з гібридною силовою установкою. Більш того, можливий і варіант тролейбуса. В останньому випадку він оснащується двома тяговими електродвигунами потужністю по 160 кВт і штангами на даху. На даний момент метробус АКІА Ultra LF25 проходить випробування, у тому числі і на дорогах загального користування [5].

Проте найбільший у світі метробус показали у Швеції. Автовиробник Scania представив першу у світі модель трисекційного автобуса, двигун якого працює на природному газі, на міжнародній виставці Busworld Latin America у колумбійському місті Меделлін. Про це повідомляє Diariodotransporte. Модель громадського транспорту відповідає нормам Євро-6 [6].



Рисунок 1 – Метробус

Шасі метробуса має довжину 28 метрів. Кузов для нього виготовила бразильська компанія Busscar. У салоні транспортного засобу може розміститись до 250 пасажирів. Бічні двері розташовані високо від землі, щоб бути на рівні з посадковою платформою на зупинках. Він призначений для лінії швидкісного автобусного сполучення, яка розповсюджена у країнах Південної Америки. Автобус на шасі Scania економніший на 25 % порівняно з дизельним двосекційним аналогом. Інженерам вдалося зменшити кількість шкідливих викидів у атмосферу на 90 %. У його відпрацьованих газах повністю відсутня сажа. Ще однією перевагою такого транспорту є те, що його двигун не вимогливий до якості пального й має значно більший ресурс.

Система BRT має низку незаперечних переваг [4]:

- висока пасажиромісткість і ефективні платіжні системи забезпечують недорогий проїзд;
- висока швидкість пересування дозволяє метробусу перевозити вагому частку пасажиропотоку, що сприяє зменшенню кількості автомобілів на дорогах міста і, відповідно, зменшенню викидів відпрацьованих газів;
- розширена інформаційна система інформує пасажирів про розклад маршрутів.

У даний час, все більше міст вибирають систему швидкісного автобусного транспорту, зокрема за такими показниками, як вартість і зручність. У порівнянні, вартість будівництва такого рейкового ширококолісного транспорту, як метро, у 10 разів вища, ніж BRT. Більш того, міста, які вибирають систему BRT, можуть бачити результати своєї праці в дуже короткі терміни, впровадження системи може зайняти 2 роки, а будівництво метро може затягнутися на десятиліття.

Сьогодні метробуси працюють у багатьох країнах: США, Бразилія, Венесуела, Колумбія, Гватемала, Канада, Мексика, Австралія, Нова Зеландія, Японія, Іран, Туреччина, Франція, Чехія та ін. Цей список швидко оновлюється, оскільки все більше міст ухвалює рішення на користь системи BRT.

У різних містах і країнах система може виглядати по-різному: десь будують спеціальні зупинні пункти з платформою, в інших використовують невеликі станції зупинки. Єдиного стандарту ніде не немає, кожне місто вирішує свої проблеми по своєму, враховуючи географічне положення міста, рух пасажиропотоку, забудову міста. Але всі сходяться в одному – BRT відмінний помічник у вирішенні екологічної і транспортної задачі [4].

Найвідоміша мережа BRT – TransMilenio в столиці Колумбії, місті Богота, яка на сьогоднішній день складається з 9 ліній. Ця система почала свою роботу в 2000 р. і з перших днів почала користуватися величезною популярністю. Систему відрізняє зважений сучасний підхід при проектуванні. Створення системи позитивно позначилося на економіці міста і умовах життя його населення.

Варто також відзначити і системи BRT в інших точках світу. Це і перша Rede Integrada de Transporte (Бразилія), і Метробус Буенос-аєреса (Аргентина), і Оранжева лінія (Лос-анжелес, США), і багато інших.

Для цього виду міського транспорту не існує поняття пробок, які раз у раз виникають зліва і справа, – в сусідніх рядах, де завмирають автобуси, таксі.

Метробуси йдуть один за одним «караванами» по три-п'ять-сім автобусів. Якихось обмежень на інтервал або відстань між ними немає, водії орієнтуються по обстановці і самі регулюють відстань до попереднього автобуса.

У лютому 2014 року в Астані презентували проект «BRT. Швидкісні автобусні перевезення». У ході презентації було озвучено безліч переваг цього виду транспорту, зокрема: BRT – це перевезення великої кількості людей і вплив на організацію дорожнього руху, BRT – це формат більше для людей, а не для транспорту. BRT – це ліки для транспортної системи і складена вона так, щоб люди побачили якість, сучасність, мобільність, безпеку, архітектуру й ін. зручності і більше орієнтувалися на суспільний транспорт [4].

Зручність, безпека і покращена організація дорожнього руху це далеко не все, що зможе дати пасажиром нова система швидкісного автобусного транспорту. Згідно з цим проектом пасажирські швидкісні автобуси пересуватимуться по спеціально виділених смугах. Вони будуть відокремлені від проїжджої частини і обладнані закритими пасажирськими станціями з платформами на одному рівні і підземними переходами.

Спочатку буде побудовано і запущено 18 станцій, які з'єднають аеропорт, ЕКСПО-містечко, «Абу-дабі Плаза» і новий залізничний вокзал. Потім їх кількість поступово збільшуватиметься. Станції оснастять комплексом життєзабезпечення, системами безпеки доступу, електронною системою оплати (за принципом метро), ескалаторами і ліфтами.

В теперішній час будівельні роботи по будівництву БРТ вже початі. Перша черга цього проекту почала експлуатуватися в Астані у 2016 р. [7].

Схожу систему хочуть створити в Уфі. Потенційним інвестором є компанія «CAPITALNET A.S.» (Стамбул), яка вже створила подібну систему в Стамбулі. Туреччина готова сама все спроектувати і запустити в експлуатацію, що як би натякає на прибутковість цієї справи і зацікавленість інвестора. Також відомо, що проект буде виконуватися у дві черги: перша (23 км.) імовірно пройде по трасі, на якій пасажиропотоку особливо немає (точки тяжіння: Аеропорт, Мегаполіс і кінцевий район); про другу особливо нічого не сказано, окрім довжини – 32 км.

Таким чином, у разі створення такої системи в Уфі, місто спочатку отримає щось типу аероекспресу і лише потім міську систему метробуса.

Рухомий склад турецька сторона запропонувала двох видів: класичний, використовуваний сьогодні, зокрема, в Стамбулі, що працює на газовому паливі; другий варіант – метробус нового покоління з гібридним електро-газовим двигуном. Ці два варіанти влативі зчленованим автобусам, 18-ти і 24-х метрової довжини [6].

З'явиться метробус і в Києві. Перший маршрут пройде від Троєщини до Севастопольської площі. Ємність цієї лінії експерти оцінюють в 140 тисяч пасажирів на добу. Друга лінія пройде по Лівому берегу – від Дарницької площі на Лісовий масив, її ємність оцінюють в 160 тисяч пасажирів на добу. Пасажиропотік буде порівняний з тим, що щодня проходить через Сирецько-Печерську лінію. Попередня оцінка бюджету проекту – 100–120 мільйонів доларів. Ця сума включає реконструкцію магістралей, облаштування виділеної смуги з посадочними вузлами, реконструкцію перехрест'я і закупівлю рухомого складу для метробуса [7].

Підсумовуючи, що можна сказати? На перший погляд, подібні рішення здаються неймовірно елегантними і ефективними. Багатьом представляється, що це – мало не ідеальне вирішення організації виділених смуг. Проте, давайте поглянемо на це з іншого боку. Недоліки такого підходу очевидні [4].

1. Автобус – найнеекономічніший вид наземного транспорту. Трамвай, або навіть тролейбус, на таких масових перевезеннях були б куди ефективніші. Крім того, не забуваємо і про екологію.

2. У разі метробуса втрачається одна з основних переваг автобуса над іншими видами транспорту – маневреність, і можливість проїзду по будь-яких вулицях без створення додаткової інфраструктури. Насправді, тут автобус йде по одній лінії, можливість повертати вправо-вліво не використовує, на інші вулиці не виїжджає.

3. Автобуси маломісткі. Як ми бачили, в деяких системах використовуються трисекційні автобуси, але більшість з них – звичайні двосекційні. Місткість двосекційного автобуса приблизно

дорівнює місткості одного трамвайного вагона (150–180 чоловік), у разі низькопідлогових автобусів – ще менше. Трисекційний автобус вміщатиме трохи більше пасажирів.

Проте у використанні автобуса якийсь сенс є. Маневреність, все ж таки, використовується. Скажімо, трамвай, що зупинився, – затор на лінії, поки його кудись не відтягнуть. Автобус, що зупинився, можна і об'їхати, та і зняти з лінії і відправити своїм ходом його простіше. Інфраструктура виходить багато дешевша і простіша в підтримці. Хоча, звичайно, і тут не без проблем. Скажімо, коли пустили першу лінію метробуса в Мехіко, виявилось, що звичайний тонкий асфальт витримати не може потоку важких автобусів. Довелося укласти щось міцніше (але, принаймні, поки асфальт укладали, рух можна було не припиняти: Метробуси об'їжджали ремонтвані квартали по загальному трафіку). У будь-якому випадку, рішення було простим і швидким.

Ідеї з новими трамваями в Мексиці, на жаль, далі за демонстраційні трамваї на головній площі поки не проходять, а метробуси будуються швидко і в багатьох містах відразу. Так, там де є трамвайна інфраструктура, можливо, в якихось ситуаціях трамвай кращий – тут повинні думати фахівці. Але метробусна ідея цілком життєздатна [4]. Проте при реалізації цієї ідеї виникають труднощі, пов'язані, перш за все, з прокладенням траси. Визначити радіуси заокруглень такої траси є актуальною задачею. **Метою роботи** є визначення габаритної смуги руху дво- і триланкових метробусів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проведеними на-сьогодні дослідженнями [9, 10] встановлено, що на попередньому етапі габаритні радіуси повороту і габаритну смугу руху (ГСР) можна визначати на жорстких у бічному напрямку колесах. Зважаючи на те, що дволанковий автобус можна розглядати як окремий випадок триланкового, подальші дослідження проведені для триланкового метробуса. Кінематична схема такого метробуса наведена на рис. 2.

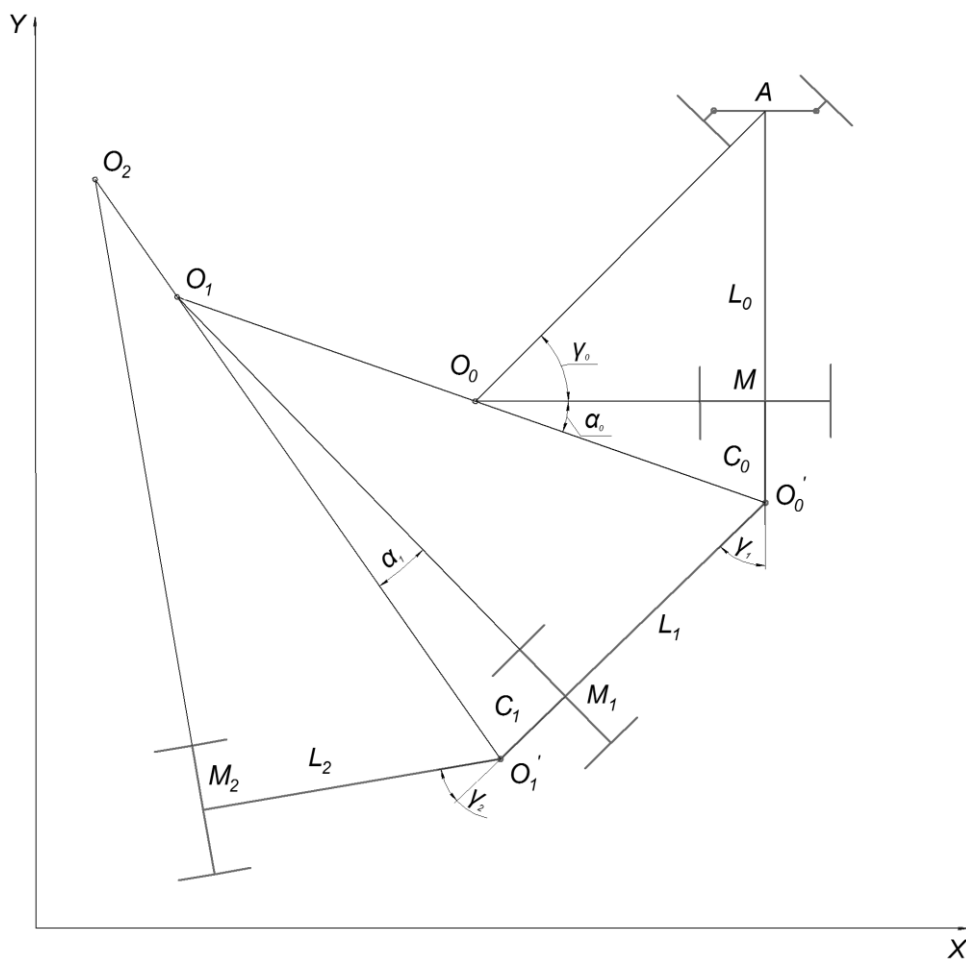


Рисунок 2 – Схема повороту триланкового метробуса

Елементарні кінематичні ланки (автобус і причепа), що входять до складу триланкового метробуса, розглядаються в подальшому як абсолютно жорсткі тіла, без врахування можливих

внутрішніх деформацій пружних елементів, які входять до їх складу, тому вертикальні переміщення центрів мас і нахил підресорених мас виключається.

Рух елементарної кінематичної ланки вважається обмеженим неголономним зв'язком, тобто напрям швидкостей усіх точок ходової осі ланки їй перпендикулярні. Бокове відведення еластичних шин коліс і рух ланки вздовж його ходової осі вважається неможливим. Це важливе припущення веде до того, що проекції поздовжньої осі ланки першого роду і діаметральної площини середнього приведенного колеса ланки другого роду на опорну поверхню завжди дотичні до траєкторії головних їх точок M [9].

Будемо вважати, що опорна поверхня, по якій відбувається криволінійний рух метробуса, строго горизонтальна і має покращене покриття, яке не створює значного опору рухові.

Шарнірні спряження з вертикальною віссю елементарних кінематичних ланок автопоїздів дозволяють їм здійснювати безперешкодне переміщення в горизонтальній площині.

Якщо відома або задана траєкторія головної точки автомобіля-тягача, то можна тим або іншим методом знайти траєкторію головної точки M будь-якої ланки, тобто середини ходової осі ланки і, відповідно, положення причепа або напівпричепа буде визначеним [8].

Знаючи траєкторії кожної ланки, можна визначити характер руху і розташування на дорозі автопоїзда в цілому. Однак з усіх траєкторій автопоїзда одна є головною, що визначає характер його руху і повністю залежить від водія, який управляє автопоїздом, керуючись обставинами на дорозі – головна траєкторія автопоїзда.

При переході від прямолінійного руху до кругового кут γ_0 повороту керованих коліс збільшується від нуля до деякої постійної величини $\gamma_{0\text{MAX}}$, обумовленої конструкцією автомобіля-тягача. При переході від кругового руху до прямолінійного цей кут навпаки зменшується від $\gamma_{0\text{MAX}}$ до нуля [8].

В експлуатаційних умовах головним видом руху є перехідний (нестационарний) рух автопоїзда, бо кут γ_0 безперервно змінюється. Його величина значною мірою залежить від індивідуальних якостей водія і обумовлена обставинами, що виникають на дорозі. Форма перехідної траєкторії (вхідної і вихідної) у цих умовах залежить не тільки від геометричних, але і кінематичних параметрів автомобіля: кутової швидкості $\dot{\gamma}_0$ повороту керованих коліс і його поступальної швидкості v_0 руху на повороті. Швидкість v_0 умовно віднесена до середини ведучої осі автомобіля, тобто точки M , що описує головну траєкторію [8].

Приведена кутова швидкість повороту керованих коліс автомобіля $\dot{\gamma}_0$ в значній мірі визначає траєкторію криволінійного руху автомобіля й інші параметри цього руху для всього автопоїзда. Залежність кутової швидкості $\dot{\gamma}_0$ від часу або шляху криволінійного руху графічно виражається кривою, характер якої не дозволяє встановити просту функціональну залежність $\dot{\gamma}_0 = f(t)$ або $\dot{\gamma}_0 = f'(s)$ [8].

Згідно з численними експериментами значення середньої кутової швидкості $\dot{\gamma}_0 = 0,01-0,015 \text{ c}^{-1}$. Але суттєве значення для характеру криволінійного руху має не абсолютна величина $\dot{\gamma}_0$, а її відношення до поступальної швидкості автомобіля (режимний коефіцієнт повороту) тобто співвідношення [8]:

$$\frac{\dot{\gamma}_0}{v_0} = K_{\Pi}. \quad (\text{м}^{-1}) \quad (1)$$

Фізичний зміст K_{Π} – зміна приведенного кута γ_0 на одиницю довжини пройденого шляху серединою ведучої осі автомобіля або автомобіля-тягача. Експерименти показали, що значення K_{Π} на вхідній і вихідній ділянках повороту різні, це пояснюється тим, що водій на вихідній траєкторії почуває себе більш безпечно і тому з більшою кутовою швидкістю обертає рульове колесо, але для спрощення розрахунків можна вважати, що значення K_{Π} на вході і на виході рівні [8].

При русі по круговій траєкторії з постійним радіусом останній залежить лише від геометричних параметрів автомобіля: від бази L_0 і приведенного кута γ_0 повороту керованих коліс

$$R_0 = \frac{L_0}{\text{tg}\gamma_0}. \quad (2)$$

Рівняння перехідної траєкторії автомобіля отримаємо після диференціювання (2) [8]:

$$x_0 = \frac{1}{K_{II}} \cdot \int_0^{\gamma_{0MAX}} \cos\left(-\frac{\ln \cos(\gamma_0)}{K_{II} \cdot L_0}\right) d\gamma_0, \quad (3)$$

$$y_0 = \frac{1}{K_{II}} \cdot \int_0^{\gamma_{0MAX}} \sin\left(-\frac{\ln \cos(\gamma_0)}{K_{II} \cdot L_0}\right) d\gamma_0. \quad (4)$$

В дужках підінтегрального виразу приведений кут δ_0 нахилу повздовжньої осі автомобіля-тягача до осі абсцис.

Як випливає з (3) і (4), перехідна траєкторія автомобіля-тягача визначається його базою, кутом повороту керованих коліс і режимним коефіцієнтом повороту.

Кругова траєкторія повністю характеризується двома параметрами: радіусом кривизни R_{0MIN} або розташуванням центра C кривизни дуги 1–2 і кутом φ_K кругової траєкторії (див. рис. 2). Координати центра кругової ділянки [8]:

$$x_C = x_0 - R_{0MIN} \cdot \sin(\delta_{MAX}), \quad (5)$$

$$y_C = y_0 - R_{0MIN} \cdot \cos(\delta_{MAX}). \quad (6)$$

Значення x_0 , y_0 , R_{0MIN} і δ_{MAX} відповідають положенню автомобіля-тягача в кінці стадії входження у поворот. Центральний кут [8]

$$\varphi_K = \psi - 2\delta_{MAX}, \quad (7)$$

де ψ – необхідний кут повороту автомобіля-тягача.

Якщо кругової ділянки на головній траєкторії немає, то, в залежності від режимного параметра K_{II} і кута повороту автопоїзда ψ [8], допустимий мінімальний радіус повороту

$$R_{0MIN} \geq L_0 \cdot \sqrt{(e^{K_{II} \cdot L_0 \cdot \psi} - 1)^{-1}}. \quad (8)$$

Довжина криволінійної траєкторії автопоїзда у загальному випадку:

$$X_{II} = \overline{OP} \cdot (1 + \cos \psi). \quad (9)$$

Відстань \overline{OP} в загальному випадку, тобто при $180^\circ > \psi > 0$ і $\varphi_K \neq 0$

$$\overline{OP} = x_C + y_C \cdot \operatorname{tg}(0,5\psi). \quad (10)$$

При $\varphi_K = 0$

$$\overline{OP} = x_0 + y_0 \cdot \operatorname{tg}(0,5\psi). \quad (11)$$

Ширина криволінійної траєкторії в загальному випадку

$$Y_{II} = \overline{OP} \cdot \sin \psi. \quad (12)$$

Отримані вирази дають повне уявлення про закономірності і взаємозв'язки характеристичних параметрів головної траєкторії при односторонньому криволінійному русі.

Траєкторія кожної ланки метробуса визначається траєкторією її головної точки, тобто при розгляді питань кінематики повороту триланкового метробуса його можна звести до двовісного автобуса і двох одновісних причепів, рис. 2.

У такому випадку триланковий метробус можна розділити на дві пари кінематичних ланок – автобус + перший причіп і перший причіп + другий причіп [8]. Згідно з теоремою про складання обертання фігури навколо паралельних осей, складний криволінійний рух твердого тіла складається з абсолютного руху в нерухомій (абсолютній) системі координат, відносного руху по відношенню до спряженого з ним ведучого твердого тіла і переносного руху останнього.

Розглянемо ці загальнотеоретичні положення по відношенню до першої пари ланок метробуса, а саме автобус + перший причіп з центрально неповоротною віссю. При цьому для спрощення викладок приймаємо, що точка зчипки автобуса з причепом збігається з головною точкою автобуса.

Рух ланок метробуса по відношенню до опорної поверхні (площині XOY) є абсолютним і в кожний даний момент обертання кожна його ланка має свій миттєвий центр обертання: автобус т. O_0 і причіп – т. O_1 . Ведена ланка (причіп), здійснюючи абсолютний рух навколо центра O_1 , одночасно переміщується відносно ведучої ланки (автобуса) з миттєвим центром O'_0 обертання в точці зчипки. При цьому між поздовжніми осями ланок виникає кут складання γ_1 . Рух же автобуса є для причепа переносним з миттєвим центром обертання в точці O_0 . Таким чином, ведена ланка – причіп здійснює складний рух: переносний з автобусом з кутовою швидкістю ω_c , відносний – з кутовою швидкістю ω_k і абсолютний – з кутовою швидкістю ω_1 і з відповідними центрами обертання O_0, O'_0, O_1 .

При односторонньому криволінійному русі автопоїзд проходить декілька стадій [8]:

- стадія початкового прямолінійного руху (перед поворотом), в якій абсолютні миттєві центри швидкостей автобуса і причепа знаходяться в нескінченності; відносна кутова швидкість ведучої ланки рівна нулю;

- стадія входження в поворот, у якій рух по головній вхідній траєкторії характеризується тим, що кут повороту керованих коліс автобуса збільшується від нуля до деякої заданої водієм величини; в окремому випадку – поворот з місця, без руху по вхідній траєкторії. Абсолютні миттєві центри обертання автобуса і причепа поступово переміщуються (при повороті з ходу) по лінії $\overline{O_0O'_0}$ з нескінченності до положення, що відповідає: для автобуса – поворот керованих коліс на кут γ_{0MAX} (точка C), а для причепа – деякому значенню кута складання γ_1 ланок. Відстань $\overline{O_0O'_0} \neq 0$, а відносна кутова швидкість обертання причепа $d\gamma_1/dt < 0$;

- стадія кругового повороту, в якій рух автомобіля-тягача відбувається по коловій траєкторії з постійним радіусом. Кут повороту керованих коліс ведучої ланки досягає свого максимального значення на цьому повороті і залишається деякий час постійним. Абсолютний миттєвий центр обертання O_0 автобуса займає положення, яке відповідає мінімальному радіусові R_{0MIN} . Абсолютний миттєвий центр обертання причепа може розташовуватися таким чином. При першому варіанті, тобто при неграничному повороті, центр O_1 не досягає кінця стадії кругового повороту і відстань $\overline{O_0O_1}$ на цій стадії залишається більшою нуля. Відносна кутова швидкість причепа $d\gamma_1/dt < 0$. Іншими словами, круговий поворот автобуса закінчується до того, як збігаються переносний і абсолютний центри обертання причепа. Це найбільш поширений випадок повороту метробуса. При другому варіанті, тобто при граничному повороті, круговий рух автобуса закінчується після того, як переносний і абсолютний центри обертання причепа збігаються з абсолютним центром обертання автобуса. Відносна кутова швидкість $d\gamma_1/dt = \omega_0 = \omega_1$, тобто весь автопоїзд обертається як єдине ціле навколо єдиного центра;

- стадія виходу з повороту, в якій рух автобуса відбувається по головній вихідній траєкторії при поступовому зменшенні кута γ_0 від γ_{0MAX} для даного повороту до нуля при виході на пряму. Так, як і при вході в поворот, керовані колеса можуть бути повернуті на місці, тобто при режимному параметрі $K_{II} \rightarrow \infty$. При виході з повороту абсолютні миттєві центри обертання автобуса і причепа поступово переміщуються у нескінченність, залишаючись на одній лінії $\overline{O_1O'_0}$, а відстань $\overline{O_1O'_0}$ все інтенсивніше збільшується;

- вихід автобуса на прямолінійну траєкторію. Ця стадія характерна тим, що хоча автобус і рухається прямолінійно ($\gamma_0 = 0, \omega_0 = 0$), причіп, як правило, продовжує криволінійний рух асимптотично наближуючись до прямолінійної траєкторії автобуса і кут складання зменшується.

Розглянуті закономірності криволінійного руху першої пари ланок триланкового метробуса, а саме автобус і причіп справедливі і для другої пари – перший і другий причепа.

Аналіз залежностей криволінійного руху метробуса дає чітку картину процесу повороту. Однак практично важливу задачу визначення положення його причіпних ланок на повороті він не вирішує. Для цього необхідно знайти величини кутів складання, які визначають положення ведених причіпних ланок метробуса на повороті.

У роботі [8] отримані рівняння кутів складання для триланкового автопоїзда з двома причепами, що записані у вигляді

$$\frac{d\gamma_1}{d\gamma_0} = \frac{\operatorname{tg}(\gamma_0)}{K_{II} \cdot L_0} \cdot \left(1 - \frac{L_0}{\operatorname{tg}(\gamma_0) \cdot \cos(\alpha_0)} \cdot \frac{\sin(\gamma_1 - \alpha_0)}{L_1} \right), \quad (13)$$

$$\frac{d\gamma_2}{d\gamma_0} = \frac{\sin(\gamma_1 - \alpha_0)}{K_{II} \cdot L_1 \cdot \cos(\alpha_0)} \cdot \left(1 - \frac{L_1 \cdot \cos(\gamma_1 - \alpha_0) \cdot \sin(\gamma_2)}{\sin(\gamma_1 - \alpha_0) \cdot L_2} \right). \quad (14)$$

Отримані диференціальні рівняння у загальному вигляді не інтегруються, але це можна зробити за допомогою прикладного програмного забезпечення для ПЕОМ, наприклад Mathcad, яке і було використане для розв'язання розробленої математичної моделі. На рис. 3 у якості прикладу наведені результати розрахунків кутів складання метробуса з базовими конструктивними параметрами (довжина ланок метробуса $L_a=9,0$ м; $L_{n1}=8,0$ м; $L_{n2}=8,0$ м; база ланок метробуса 5,0 м) і некерованими причіпними ланками для різних стадій повороту.

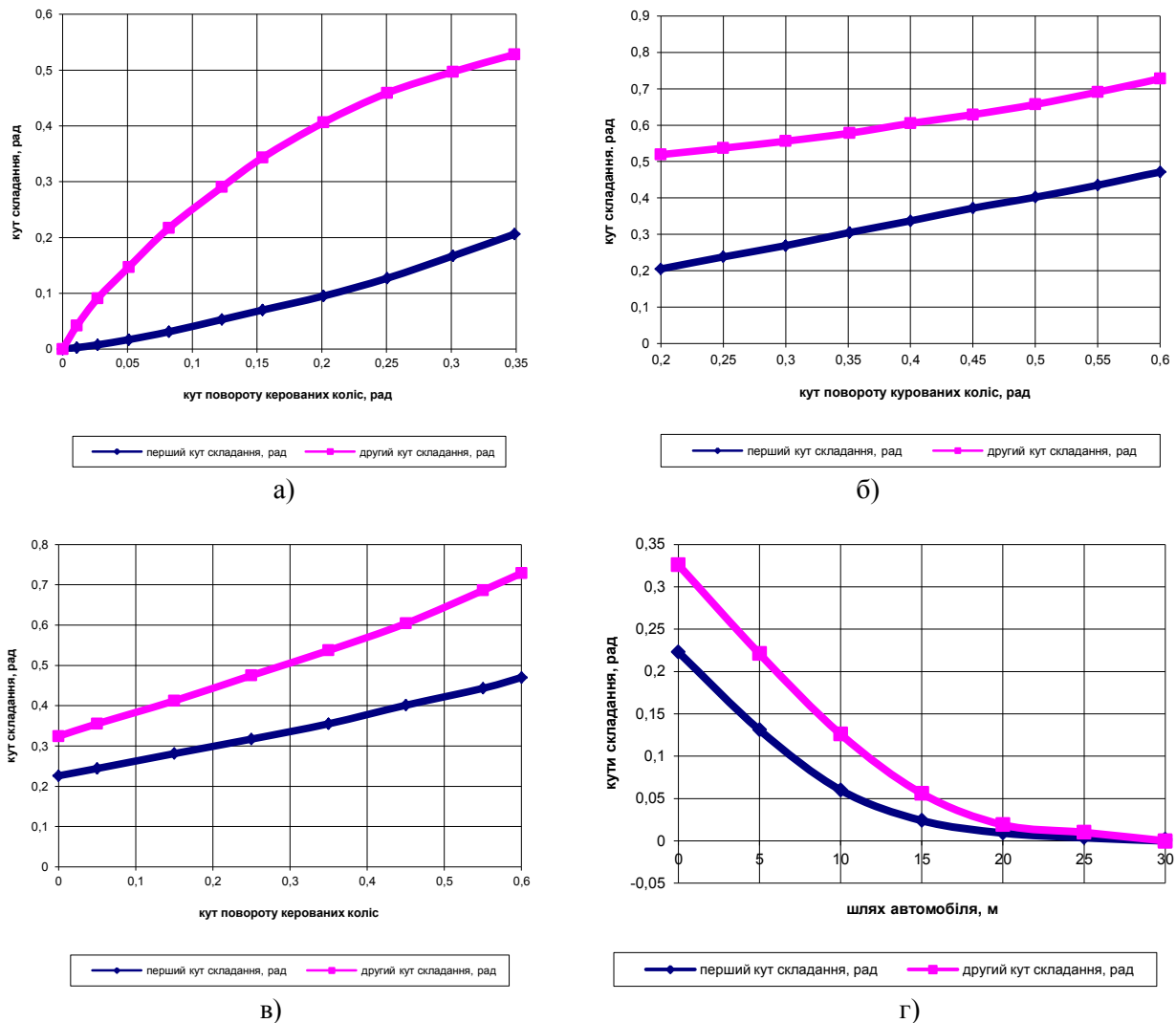


Рисунок 3 – Зміна кутів складання ланок автопоїзда для різних стадій повороту: а) вход в поворот; б) рух по колу; в) вихід із повороту; г) прямолінійний рух першої ланки

Аналіз результатів розрахунків показав:

- поворот усіх елементарних кінематичних ланок здійснюється на першій стадії послідовно, причому друга причіпна ланка забігає більш інтенсивно у внутрішню сторону повороту, збільшуючи другий кут складання у порівнянні з першим. Аналогічно змінюються і швидкості обертання ланок метробуса незалежно від режиму його повороту. Співвідношення кутів γ_0 і γ_1 в кінці першої стадії повороту складає біля 0,57, у той час як співвідношення кутів γ_2 і γ_1 становить більше одиниці;

- кути складання суттєво залежать від режиму криволінійного руху метробуса. Зі зменшенням режимного коефіцієнта повороту зменшуються і кути складання його ланок γ_1 і γ_2 при одному і тому ж значенні приведенного кута повороту γ_0 керованих коліс автобуса, оскільки метробус займає при цьому менш «складене» положення;

- кути складання γ_1 і γ_2 пропорційні базам ланок і тому зі збільшенням баз елементарних ланок кути складання γ_1 і γ_2 збільшуються за тих же значень режимного коефіцієнта повороту, а відповідно, метробус буде більше «складеним» на криволінійній ділянці шляху;

- при односторонньому повороті траєкторії причіпних ланок зміщуються по відношенню до траєкторії ведучої ланки до центра повороту, збільшуючи при цьому габаритну смугу руху, причому зміщення траєкторій і ГСР збільшуються зі збільшення бази причіпних ланок.

Аналогічні розрахунки кутів складання були виконані і для дволанкового метробуса загальною довжиною 22,0 м і довжиною окремих ланок 11,0 м при базі обох ланок 6,0 м.

У таблиці 1 наведені результати розрахунку зміщення траєкторій окремих ланок дво- і триланкового метробуса для різних стадій повороту, а на рис. 4 – траєкторії ланок метробусів.

Таблиця 1 – Максимальне зміщення траєкторії причепів щодо траєкторії автобуса

Зміщення траєкторії дволанкового метробуса при повороті / ГСР, м				Зміщення траєкторії триланкового метробуса при повороті, м			
90°	180°	270°	360°	90°	180°	270°	360°
4,8/7,3	5,6/8,1	5,9/8,4	6,4/8,9	4,3/6,8	5,7/8,2	7,0/9,5	7,4/9,9

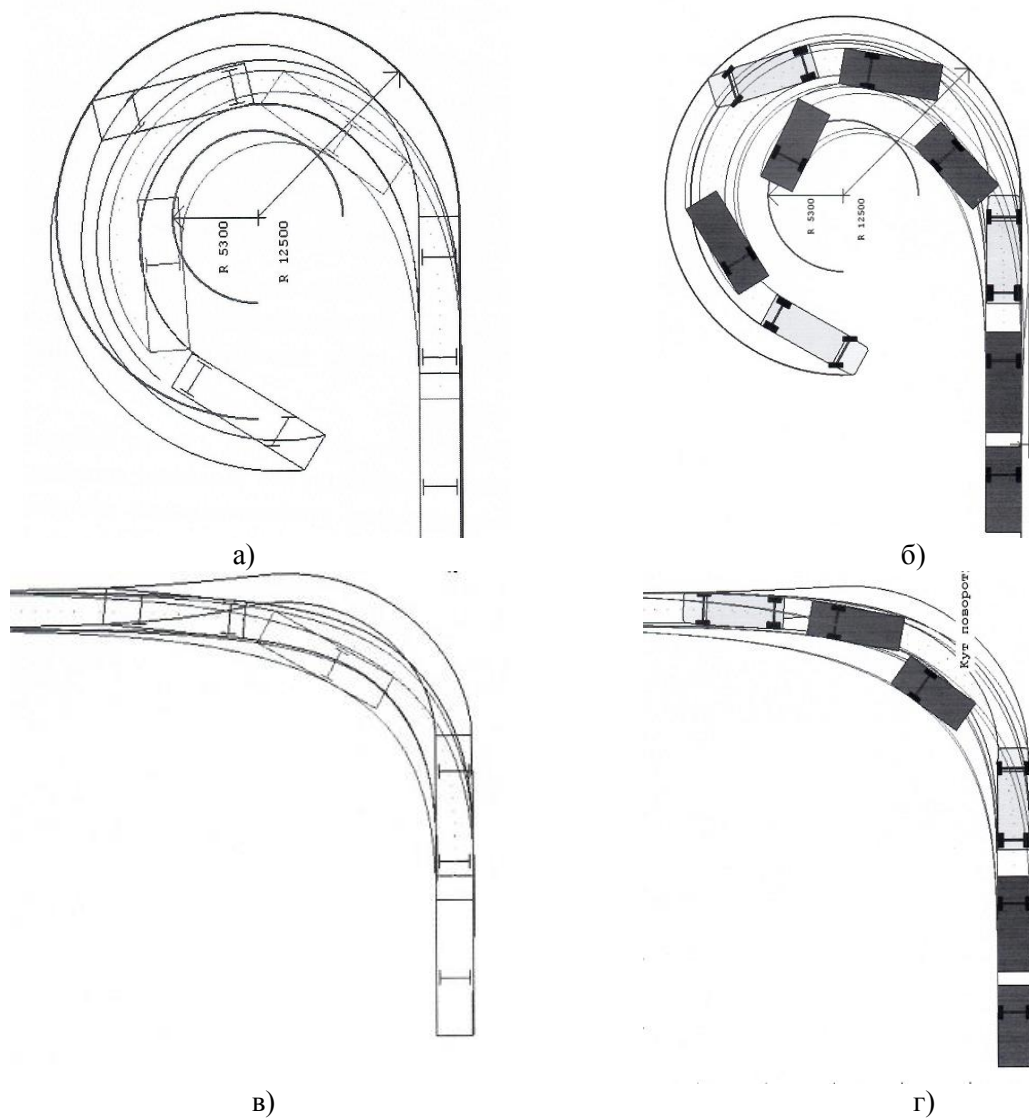


Рисунок 4 – ГСР дволанкового (а, в) і триланкового метробуса (б, г) при повороті дороги на 270° (а, б) і 90° (в, г)

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано переваги і недоліки системи BRT (Bus rapid transit), яка визначена як спосіб організації автобусного (або тролейбусного) сполучення, що відрізняється вищими експлуатаційними характеристиками порівняно зі звичайними автобусними маршрутами (швидкість, надійність, провізна здатність). За деякими параметрами (зокрема, за швидкістю) системи швидкісного автобусного транспорту порівнянні з системами легкорельсового транспорту (швидкісного трамваю).

2. Показано, що при реалізації системи BRT виникають труднощі, пов'язані, перш за все, з прокладенням траси, а саме з визначенням її ширини як на прямолінійних участках дороги, так і при заокругленнях, тобто з визначення габаритної смуги руху дво- і триланкових метробусів.

3. Визначено максимальне зміщення траєкторії причепів щодо траєкторії автобуса для дво- і триланкових метробусів, а відповідно і їх габаритної смуги руху. Для триланкових метробусів ГСР складає 9,9 м, що значно перевищує допустиму за DIRECTIVE 2002/7/EC [11]. Зменшити ГСР метробуса можна за рахунок керованих коліс (осі) причепа.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Швидкісний трамвай. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Швидкісний_трамвай.
2. BRT – MetroBus. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://bus10.kz/index.php/menu2-brt>
3. Метробус или новая система автобусного движения. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://econet.ru/articles/4435-metrobus-ili-novaya-sistema-avtobusnogo-dvizheniya>.
4. Метробусы. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://griphon.livejournal.com/222403.html>.
5. Метробусы могут появиться в Киеве. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.autocentre.ua>.
6. У Швеції показали найбільший у світі метробус. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ukurier.gov.ua/uk/news/u-shveciyi-pokazali-najbilshij-u-sviti-metrobus-fo/>.
7. Метробус в России. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://gre4ark.livejournal.com/52087.html>.
8. Закин Я. Х. Прикладная теория движения автопоезда / Я. Х. Закин. – М.: Транспорт, 1967. – 225 с.
9. Сахно В. П. До визначення показників маневреності шарнірно-зчленованих автобусів / В. П. Сахно, І. С. Мурований, В. Е. Селезньов // Вісник Машинобудування та транспорту : науковий журнал. – 2016. – № 2. – С. 97–105.
10. Порівняльна оцінка маневреності триланкових автопоїздів / В. П. Сахно, В. М. Поляков, Р. М. Марчук, П. О. Гуменюк // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2012. – № 2(53). – С. 127–134.
11. DIRECTIVE 2002/7/EC of European parliament and of the council of 18 February 2002 amending Council Directive 96/53/EC of 25 July 1996 laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorized dimensions in national and international traffic and the maximum authorized weights in international traffic. // Official Journal of the European Communities. – 2002. – No L67/47-49.

REFERENCES

1. Shvydkisny tram. – [Electronic resource]. Access Mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/Shvydkisny_tramvay
2. BRT - MetroBus. - [Electronic resource]. Access mode: <https://bus10.kz/index.php/menu2-brt>
3. Metrobus or a new bus system. - [Electronic resource]. Access mode: <https://econet.ru/articles/4435-metrobus-ili-novaya-sistema-avtobusnogo-dvizheniya>
4. Metrobus. - [Electronic resource]. Access mode: <https://griphon.livejournal.com/222403.html>
5. Metrobus may appear in Kiev. - [Electronic resource]. Access mode: <https://www.autocentre.ua>
6. In Sweden, the metrobus was found the most in the city. - [Electronic resource]. Access mode: <https://ukurier.gov.ua/uk/news/u-shveciyi-pokazali-najbilshij-u-sviti-metrobus-fo/>
7. Metrobus in Russia. - [Electronic resource]. Access mode: <https://gre4ark.livejournal.com/52087.html>
8. Zakin J. Kh. Applied theory of the movement of a train / Ya. Kh. Zakin - M.: Transport, 1967.-225 s.

9. Sakhno V. P. Before the appointment of the demonstration of the maneuverability of the articulated buses / V. P. Sakhno, I. S. Murovanov, V. C. Seleznyov - Scientific journal // News of Machinery, production of transport. Vinnitsa, 2016 - № 2. - p. 97-105.

10. Sakhno V. P. Porivnyalnaya the assessment of the maneuverability of trilankovyh autopozdiz / V. P. Sakhno, V. M. Polyakov, R. M. Marchuk, P. O. - № 2 (53) - 2012. - P. 127-134.university. - №2(53) – 2012. -С. 127-134.

11. DIRECTIVE 2002/7/EC of European parliament and of the council of 18 February 2002 amending Council Directive 96/53/EC of 25 July 1996 laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorized dimensions in national and international traffic and the maximum authorized weights in international traffic. // Official Journal of the European Communities. – 2002. – No L67/47-49.

В. П. Сахно¹, В. В. Біліченко², В. М. Поляков¹, О. Є. Омельницький¹

МАНЕВРЕНІСТЬ МЕТРОБУСІВ

¹Національний транспортний університет

²Вінницький національний технічний університет

Проаналізовано переваги і недоліки системи BRT (Bus rapid transit), яка визначена як спосіб організації автобусного (або тролейбусного) сполучення, що відрізняється вищими експлуатаційними характеристиками у порівнянні зі звичайними автобусними маршрутами (швидкість, надійність, провізна здатність). За деякими параметрами (зокрема, за швидкістю) системи швидкісного автобусного транспорту порівнянні з системами легкорельсового транспорту (швидкісного трамвая). Показано, що при реалізації системи BRT виникають труднощі, пов'язані, перш за все, з прокладенням траси, а саме з визначенням її ширини як на прямолінійних відрізках дороги, так і при заокругленнях, тобто з визначення траєкторії кожної ланки дво- і триланкових метробусів.

Траєкторія кожної ланки метробуса визначається траєкторією її головної точки, тобто при розгляді питань кінематики повороту триланкового метробуса його можна звести до двовісного автобуса і двох одновісних причепів.

Показано, що при односторонньому криволінійному русі автопоїзд проходить декілька стадій, а саме стадія початкового прямолінійного руху, стадія входження в поворот, стадія кругового повороту, стадія виходу з повороту і вихід автобуса на прямолінійну траєкторію.

Для кожної із стадій повороту визначені кути складання для дво- і триланкових метробусів. За визначеними кутами складання отримані зміщення траєкторії причіпних ланок і габаритні смуги руху дво- і триланкових метробусів, які склали для дволанкового метробуса 8,9 м, а для триланкових метробусів 9,9 м, що значно перевищують допустимі за DIRECTIVE 2002/7/EC. Зменшити ГСР метробуса можна за рахунок керування коліс (осі) причепа.

Ключові слова: система Bus rapid transit, метробус, автобус, причіп, кут складання, зміщення, траєкторія, габаритна смуга руху, кінематика, поворот.

Сахно Володимир Прохорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Автомобілі», Національний транспортний університет, e-mail: svp_40@ukr.net

Біліченко Віктор Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: bilichenko.v@gmail.com

Поляков Віктор Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри «Автомобілі», Національний транспортний університет, e-mail: poljakov_2006@ukr.net

Омельницький Олег Євгенович, аспірант кафедри «Автомобілі», Національний транспортний університет, e-mail: oleg@autoconsulting.com.ua

V. Sakhno¹, V. Bilichenko², V. Polyakov¹, O. Omel'nickiy¹

MANOEUVRABILITY OF METROBUSES

¹National Transport University²Vinnitsia National Technical University

Advantages and lacks of the system of BRT (Bus of rapid transit), which is certain as a method of organization of bus (or trolleybus) connection which differs higher operating descriptions in comparing to the ordinary bus routes, are analysed (speed, reliability, transport ability). After some parameters (in particular, after speed) of the system of speed bus transportation comparing to the systems of clotype transport (speed a streetcar). It is rotined that during realization of the system of BRT there is a row of difficulties, CPLD, foremost, with the gasket of route, namely with determination of its width both on the rectilinear areas of road and at round, that from determination of trajectory of every link of two- and three-unit metrobuses.

The trajectory of every link of metrobus is determined the trajectory of it main point, that at consideration of questions of kinematics of turn of three-unit metrobus he can be erected to the biaxial bus and two monaxonic trailers.

It is rotined that at one-sided curvilinear motion a lorry convoy passes a few stages, namely the stage of initial rectilinear motion, stage of included in a turn, stage of circular turn, stage of exit from a turn and output of bus, is on a rectilinear trajectory.

For each of the stages of turn drafting corners are certain for two- and three-unit metrobuses. After the certain corners of drafting displacement of trajectory of the towed lanocs and overall bars of motion of two- and three-unit metrobuses is got, which made 8,9 m for two-unit metrobus, and for three-unit 9,9 m which considerably exceed possible after DIRECTIVE of 2002/7/EC. Decreasing GSR of metrobuses is possible due to the guided wheels (axes) of trailer.

Keywords: system of Bus of rapid transit, metrobus, bus, trailer, corner of drafting, displacement, trajectory, overall bar of motion, kinematics, turn

Sakhno Vladimir, doctor of technical sciences, professor, manager of department, «Cars», National Transport University, e-mail: svp_40@ukr.net

Bilichenko Victor, doctor of technical sciences, professor, manager of department of cars and transport management, Vinnitsia National Technical University, e-mail: bilichenko.v@gmail.com

Polyakov Victor, candidate of technical sciences, associate professor, professor of department «Cars», National Transport University, e-mail: poljakov_2006@ukr.net

Omel'nickiy Oleg, graduate student of department «Cars», National Transport University, e-mail: oleg@autoconsulting.com.ua

В. П. Сахно¹, В. В. Биличенко², В. М. Поляков¹, О. Е. Омельницкий¹

МАНЕВРЕННОСТЬ МЕТРОБУСОВ

¹Национальный транспортный университет²Винницкий национальный технический университет

Проанализированы преимущества и недостатки системы BRT (Bus rapid transit), которая определена как способ организации автобусного (или троллейбусного) сообщения, которое отличается высшими эксплуатационными характеристиками по сравнению с обычными автобусными маршрутами (скорость, надежность, провозная способность). По некоторым параметрам (в частности, по скорости) системы скоростного автобусного транспорта сравнимы с системами легкорельсового транспорта (скоростного трамвая). Показано, что при реализации системы BRT возникает ряд трудностей, связанных, прежде всего, с прокладкой трассы, а именно с определением ее ширины как на прямолинейных участках дороги, так и на закруглениях, т. е. из определения траектории каждого звена двух- и трехзвенных метробусов.

Траектория каждого звена метробуса определяется траекторией его главной точки, т. е. при рассмотрении вопросов кинематики поворота трехзвенного метробуса его можно привести к двухосному автобусу и двум одноосным прицепах.

Показано, что при одностороннем криволинейном движении автопоезд проходит несколько стадий, а именно стадия начального прямолинейного движения, стадия вхождения в поворот, стадия кругового поворота, стадия выхода из поворота и выход автобуса на прямолинейную траекторию.

Для каждой из стадий поворота определены углы складывания для двух- и трехзвенных метробусов. По определенным углам складывания получены смещения траектории прицепных звеньев и габаритные полосы движения двух- и трехзвенных метробусов, которые составили для двухзвенного метробуса 8,9 м, а для трехзвенных метробусов 9,9 м, значительно превышающие допустимые по DIRECTIVE 2002/7/ЕС. Уменьшить ГПД метробуса можно за счет управляемых колес (оси) прицепа.

Ключевые слова: система Bus rapid transit, метробус, автобус, прицеп, угол складывания, смещения, траектория, габаритная полоса движения, кинематика, поворот.

Сахно Владимир Прохорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобили», Национальный транспортный университет, e-mail: svp_40@ukr.net

Биличенко Виктор Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобилей и транспортного менеджмента, Винницкий национальный технический университет, e-mail: bilichenko.v@gmail.com

Поляков Виктор Михайлович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобили», Национальный транспортный университет, e-mail: poljakov_2006@ukr.net.

Омельницький Олег Евгеньевич, аспирант кафедры «Автомобили», Национальный транспортный университет, e-mail: oleg@autoconsulting.com.ua