

DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2022-1\(89\)-11-20](https://doi.org/10.26642/ten-2022-1(89)-11-20)
УДК 629.113

В.П. Сахно, д.т.н., проф.
В.М. Поляков, к.т.н., доц.
С.М. Шарай, к.т.н., доц.
Національний транспортний університет
І.С. Мурований, к.т.н., доц.
Луцький національний технічний університет

Дослідження маневреності триланкового причіпного автобусного поїзда

Метробус, або нова система автобусного руху «Швидкісний автобусний транспорт» (Bus rapid transport, BRT), є результатом розвитку мережі автобусного суспільного транспорту. Порівняно з метро цей проєкт має явні переваги: менша вартість створення мережі, менша вартість рухомого складу, мобільність та ін. Поряд із незаперечними перевагами триланкових зчленованих автобусів і тролейбусів їм притаманні і недоліки – гірші маневреність і стійкість руху порівняно з дволанковими. Крім того, ефективність експлуатації таких машин тісно пов'язана з пасажиропотоком, який протягом дня може змінюватися в рази. Тому перспективним може стати автопоїзд у складі двох (або трьох) автобусів або тролейбусів, що працюють у зчипці, пасажиромісткість яких аналогічна зчленованим автобусам і тролейбусам. У години пік працює автобусний поїзд, а у міжпіковий період – кожний автобус окремо (можлива стоянка одного автобуса на виділеному майданчику).

Для такого автобусного поїзда, що складається із трьох однотипних автобусів (на прикладі МАЗ-206), визначені показники маневреності, зокрема показано, що при неграничному повороті поворот усіх автобусів здійснюється на першій стадії послідовно, причому третій автобус забігає більш інтенсивно у внутрішню сторону повороту, збільшуючи другий кут складання, порівняно з першим, і четвертий, порівняно з третім. Під час усталеного колового руху автопоїзд у складі трьох автобусів МАЗ-206 забезпечує нормовані значення габаритної смуги руху. Позитивним при цьому також є те, що для автобусів зі стандартними системами керування їх відносна кутова швидкість суттєво зменшується і поліпшується стійкість автопоїзда під час виконання повороту.

Ключові слова: маневреність; автобус; автобусний поїзд; кут складання; кут повороту; поворот; габаритна смуга руху.

Постановка проблеми. Безпечні системи громадського транспорту все більше розглядаються як важливий засіб безпечного підвищення мобільності населення, особливо в міських районах, які страждають від зростаючих транспортних заторів. У багатьох містах з високими доходами особливо акцентується увага на політиці скорочення використання особистого автомобільного транспорту за допомогою інвестицій у розвиток мереж громадського транспорту. Інвестиції в безпечний громадський транспорт розглядаються також як механізм, що стимулює зростання фізичної активності і, отже, сприяє зміцненню здоров'я населення.

Метробус – нова система автобусного руху «Швидкісний автобусний транспорт» (Bus rapid transport, BRT), що є результатом розвитку мережі автобусного суспільного транспорту. Порівняно з метро цей проєкт має явні переваги: менша вартість створення мережі, менша вартість рухомого складу, мобільність та ін. Зручність, безпека і покращена організація дорожнього руху – це не все, що зможе дати пасажиромісткій системі швидкісного автобусного транспорту. У цій системі пасажирські швидкісні автобуси пересуваються по спеціально виділених смугах. Вони відокремлені від проїжджої частини і обладнані закритими пасажирськими станціями з платформами на одному рівні і підземними переходами. Рухомий склад, що використовується в системі BRT, це дво- і триланкові автобуси 18 і 24 метрової довжини.

Поряд із незаперечними перевагами триланкових зчленованих автобусів і тролейбусів їм притаманні і недоліки – гірші маневреність і стійкість руху порівняно з дволанковими. Крім того, ефективність експлуатації таких машин тісно пов'язана з пасажиропотоком, який протягом дня може змінюватися в рази. Тому перспективним може стати автопоїзд у складі двох (або трьох) автобусів або тролейбусів, що працюють у зчипці, пасажиромісткість яких аналогічна зчленованим автобусам і тролейбусам. У години пік працює автобусний поїзд, а у міжпіковий період – кожний автобус окремо (можлива стоянка одного автобуса на виділеному майданчику).

Маневреністю називають групу властивостей, які характеризують здатність автомобіля чи автопоїзда змінювати заданим чином своє положення на обмеженому майданчику, в умовах, які вимагають рухатись за траєкторіями великої кривизни з різкою зміною напрямлень руху, у тому числі і заднім ходом, тобто

можливість руху автопоїзда в умовах, що мають обмеження як на поверхні, так і просторі [1]. Обмеження на поверхні пов'язані з криволінійним рухом автопоїзда, тому актуальним можна вважати визначення положення його причіпних ланок на повороті.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням маневреності багатоланкових автопоїздів займалося багато дослідників, зокрема Я.Х. Закін, Я.С. Фаробін, М.С. Висоцький, роботи яких в галузі маневреності автопоїздів проаналізовані в [1]. Серед останніх робіт у галузі маневреності вантажних і пасажирських автопоїздів варто виокремити роботи [2–8] та ін. Тому зупинимося на аналізі робіт щодо маневреності автопоїздів, виконаних зарубіжними дослідниками.

У [9] показано, що розробка компактного і зручного у використанні математичного апарата та математичних моделей зчленованих транспортних засобів стають все більш доступними в епоху інтелектуальних транспортних систем, особливо коли існує потреба в надійних прогнозах руху для багатоланкових автопоїздів різної кінематичної конструкції. У роботі запропоновано модульний алгоритмічний підхід до кінематичного моделювання зчленованих автобусів. Застосування зчленувань робить довгі транспортні засоби універсальними у використанні і допускає швидке маневрування навіть у складному (наприклад, міському) середовищі. Однак маневрування шарнірно-зчленованих машин є важким, обтяжливим, а також може бути небезпечним, навіть для досвідчених водіїв. Через значні габарити шарнірно-зчленованих машин виникають численні специфічні властивості, характерні до багатовимірної неголономної кінематики. Кінематичні моделі є дійсними за умови чистого кочення коліс усього транспортного засобу (відсутність ковзання / прослизання), що практично виправдано для умови тихохідного маневрування. Пропонований підхід призводить до компактних нелінійних моделей, які завдяки своїй модульній конструкції дали змогу зберегти чітку геометричну інтерпретацію шарнірно-зчленованого автобуса. Розглянуто шарнірно-зчленовані автобуси різних компоновальних схем, пов'язаних з розташуванням ведучої осі як на автобусі, так і причепі. Проте застосування результатів цієї роботи до автобусного поїзда, що складається з окремих автобусів, проблематичне.

У [10] показано, що взаємозв'язки між осями і між ланками транспортних засобів з декількома причепами можуть породити специфічну коливальну поведінку причепів під час маневрів транспортних засобів. Показано, що такі коливання є прямим наслідком властивості кінематики транспортного засобу, пов'язаної із конструкцією тягово-зчіпного пристрою. На прикладі однієї пари ланок транспортних засобів визначаються закономірності її повороту, які надалі поширюються на автопоїзд з довільною кількістю причепів. Чисельні результати, отримані для кінематики трьох одновісних причепів, підтверджують теоретичні міркування, що дають певний кількісний погляд на проблему.

Результатами роботи [11] доведено, що для автопоїздів напівпричіпної схеми кінематична модель системи є більш складною, ніж у стандартному випадку автопоїзда з декількома причепами, стосовно її керованості. При цьому більш складні рівняння можна інтерпретувати як віртуальні рульові керування колесами, розміщеними на напівпричепі, кути повороту яких визначаються нелінійним зворотним зв'язком від вихідного стану конфігурації системи.

У [12] показано, що все більш широке використання інтелектуальної інфраструктури та терміналів з відомим місцем їх знаходження допомогло збільшити доступність до цих даних з великою просторово-часовою інформацією. Розвиток методів збору та аналізу даних дозволив дослідникам використовувати ці дані для ідентифікації міської реальності з метою вирішення міських проблем транспорту, навколишнього середовища, громадської безпеки тощо. Це дозволило на новому рівні розглянути питання міської динаміки, рухливості людей, маршрутів транспорту з урахуванням обмежень, що характерні для міського середовища.

У [13] представлено концепцію та аналіз стабільності системи управління зворотним зв'язком для відстеження траєкторії автопоїзда з довільною кількістю причепів, шарнірно з'єднаних між собою. Завдяки застосуванню каскадно-подібної структури управління, рішення, що розглядається, є модульним і дуже масштабованим щодо кількості причепів. Формальний аналіз замкнутої системи забезпечує достатні умови для асимптотичного відстеження сукупності так званих еталонних траєкторій як з постійною, так і змінною у часі кривизною траєкторії. Розглянутий у статті каскадний закон контролю траєкторії вирішує проблему відстеження кінематики багатоланкового автопоїзда.

Розглянуті роботи розв'язують певні проблеми багатоланкових автопоїздів, що складаються, як правило, з одновісних причепів і напівпричепів зі своїми системами управління, алгоритм роботи яких задає рух тягача. Для автопоїзда, що складається з окремих модулів – серійних автобусів зі своїми системами керування, питання маневреності потребує свого вирішення.

Метою роботи є дослідження маневреності триланкового причіпного автобусного поїзда, який складається з трьох стандартних автобусів, шляхом визначення показників маневреності.

Результати дослідження. Будь-яка криволінійна траєкторія складається з «відрізків» кривих і прямих ліній, поєднання яких залежить від типу повороту. Найбільш типовими є повороти на 90° і 360° , маневри «переставка» і зміна смуги руху. Траєкторії руху окремих автобусів і габаритну смугу руху автобусного поїзда (рис. 1) можна визначити шляхом інтегрування рівнянь руху.

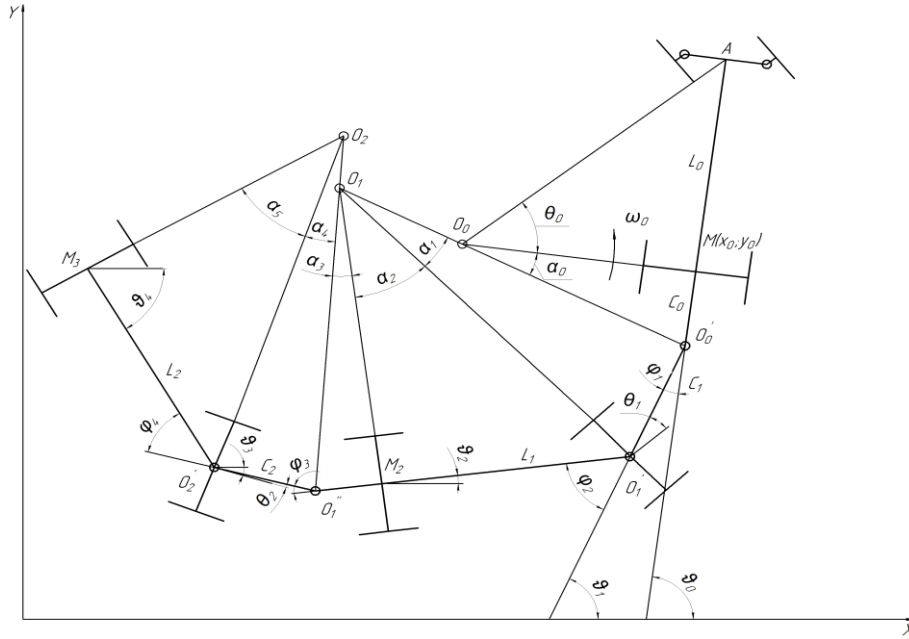


Рис. 1. Схема повороту триланкового автобусного поїзда

Зазначені рівняння руху для триланкового автопоїзда записані в [14]:

- для поздовжньої швидкості центру мас першого автобуса:

$$(m + m_1 + m_2 + m_3 + m_4)(\dot{V} - U\omega) + c\omega^2(m_1 + m_2 + m_3 + m_4) - [m_1d_1 + m_2l_1 + (m_3 + m_4)l_2][(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1)\sin\varphi_1 - (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1)^2\cos\varphi_1] - m_2d_2[(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2)\sin(\varphi_1 + \varphi_2) - (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2)^2\cos(\varphi_1 + \varphi_2)] - (m_3d_4 + m_4l_3)[(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2) \times \sin(\varphi_1 + \varphi_2) - (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2)^2\cos(\varphi_1 + \varphi_2)] - m_4d_4[(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_3 - \ddot{\varphi}_4)\sin(\varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4) - (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_3 - \ddot{\varphi}_4)^2 \times \cos(\varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4)] = -(X_1\cos\theta_0 + Y_1\sin\theta_0) + X_2 - X_{31}\cos(\theta_1 + \varphi_1 + \varphi_2) - X_{32} - Y_{31}\sin(\theta_1 + \varphi_1 + \varphi_2) - Y_{32} - X_{41}\cos(\theta_2 + \varphi_1 + \varphi_2) - X_{42} - Y_{41}\sin(\theta_2 + \varphi_1 + \varphi_2) - Y_{42};$$

- для поперечної швидкості центру мас першого автобуса:

$$(m + m_1 + m_2 + m_3 + m_4)(\dot{U} - V\omega) - c\omega^2(m_1 + m_2 + m_3 + m_4) - [m_1d_1 + m_2l_1 + (m_3 + m_4)l_2][(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1)\cos\varphi_1 + (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1)^2\sin\varphi_1] - m_2d_2[(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2)\cos(\varphi_1 + \varphi_2) - (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2)^2\sin(\varphi_1 + \varphi_2)] - (m_3d_4 + m_4l_3)[(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2) \times \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2)^2\sin(\varphi_1 + \varphi_2)] - m_4d_4[(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_3 - \ddot{\varphi}_4)\cos(\varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4) + (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_3 - \ddot{\varphi}_4)^2 \times \sin(\varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4)] = -(X_1\sin\theta_0 - Y_1\cos\theta_0) + Y_2 - X_{31}\sin(\theta_1 + \varphi_1 + \varphi_2) + Y_{31}\cos(\theta_1 + \varphi_1 + \varphi_2) + Y_{32} + X_{41} \times \sin(\theta_2 + \varphi_1 + \varphi_2) + Y_{41}\cos(\theta_2 + \varphi_1 + \varphi_2) + Y_{42};$$

- для кутової швидкості першого автобуса:

$$I\omega + [\dot{\omega}c - (U + V\omega)]c(m_1 + m_2 + m_3 + m_4) + c\{[m_1d_1 + m_2l_1 + (m_3 + m_4)l_2] \times [(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1)\cos\varphi_1 + (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1)^2\sin\varphi_1] + m_2d_2[(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2)\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2)^2\sin(\varphi_1 + \varphi_2)] + (m_3d_4 + m_4l_3)[(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2)\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2)^2\sin(\varphi_1 + \varphi_2)] + m_4d_4[(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_3 - \ddot{\varphi}_4)\cos(\varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4) + (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_3 - \ddot{\varphi}_4)^2 \sin(\varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4)]\} = H(X_1\cos\theta_0 + Y_1\sin\theta_0) + \varepsilon X_1 + a(Y_1\cos\theta_0 - X_1\sin\theta_0) + X_2H_1 - Y_2b_{11} - c[X_{31}\sin(\theta_1 + \varphi_1 + \varphi_2) + Y_{31}\cos(\theta_1 + \varphi_1 + \varphi_2) + Y_{32}] + c[X_{41}\sin(\theta_2 + \varphi_1 + \varphi_2) + Y_{41}\cos(\theta_2 + \varphi_1 + \varphi_2) + Y_{42}];$$

- для кузова другого автобуса із задньою ведучою віссю:

$$[I_1 + m_1d_1^2 + m_2l_1^2 + (m_3 + m_4)l_2^2] \times (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1) + [m_1d_1 + m_2l_1 + (m_3 + m_4)l_2] \times (\dot{V} - U\omega + c\omega^2)\sin\varphi_1 + (V\omega - \dot{U} - c\omega^2)\cos\varphi_1 - m_2d_2l_1[(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2)\cos(\varphi_2) + (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2)^2\sin(\varphi_2)] - l_2\{(m_3d_4 + m_4l_3) \times [(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_3)^2\cos(\varphi_3) + (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_3)^2\sin(\varphi_3)] + m_4d_4[(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_3 - \ddot{\varphi}_4)\cos(\varphi_3 + \varphi_4) + (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_3 - \ddot{\varphi}_4) \times \sin(\varphi_3 + \varphi_4)]\} = I_1[X_{31}\sin(\theta_1 + \varphi_2) + Y_{31}\cos(\theta_1 + \varphi_2)] + I_2 \times [X_{41}\sin(\theta_2 + \varphi_3 + \varphi_4) + Y_{41}\cos(\theta_2 + \varphi_3 + \varphi_4) + M_1 - M_2 + M_3];$$

- для керованої осі другого автобуса:

$$\begin{aligned} & (I_2 + m_2 d_2^2) \times (\ddot{\varphi}_3 - \dot{\omega} + \ddot{\varphi}_1) + (m_3 d_3 + m_4 l_3) \times \left[(\dot{V} - U\omega + c\omega^2) \sin(\varphi_1 + \varphi_3) + (V\omega - \dot{U} - c\omega^2) \cos(\varphi_1 + \varphi_3) \right] + I_2 \times \\ & \times \left[-(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1) \cos \varphi_3 + (\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1) \sin \varphi_3 \right] + l_3 m_4 d_4 \times \left[-(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_3 - \ddot{\varphi}_4) \cos \varphi_4 - (\omega - \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4)^2 \sin \varphi_4 \right] = \\ & = I_3 [X_{31} \sin(\theta_2 + \varphi_3) + X_{32} \sin \varphi_3 + Y_{31} \cos(\theta_2 + \varphi_3) + Y_{32} \cos(\varphi_3)] + M_3 - M_4 ; \end{aligned}$$

- для кузова третього автобуса з задньою ведучою віссю:

$$\begin{aligned} & [I_3 + m_3 d_3^2 + m_4 l_3^2] \times (\ddot{\varphi}_3 - \dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1) + (m_3 d_3 + m_4 l_3) \times \left[(\dot{U} - V\omega + c\omega^2) \cos(\varphi_1 + \varphi_3) + (V\omega + \dot{U} - c\omega^2) \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \right] + \\ & + I_2 \left[-(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1) \cos \varphi_3 + (\omega - \dot{\varphi}_1)^2 \sin \varphi_3 \right] + l_3 m_4 d_4 \left[-(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_3 - \ddot{\varphi}_4) \cos \varphi_4 - (\omega - \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4)^2 \sin \varphi_4 \right] = \\ & = I_3 [X_{41} \sin(\theta_2 + \varphi_4) + Y_{41} \cos(\theta_2 + \varphi_4)] + M_3 - M_4 ; \end{aligned}$$

- для керованої осі третього автобуса:

$$\begin{aligned} & (I_4 + m_4 d_4^2) \times (\ddot{\varphi}_4 + \ddot{\varphi}_3 + \dot{\omega} + \ddot{\varphi}_1) + m_4 d_4 \times \left[(\dot{U} - V\omega + c\omega^2) \sin(\varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4) + (V\omega + \dot{U} - c\omega^2) \cos(\varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4) \right] - \\ & - I_3 \left[(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_3) \cos \varphi_4 - (\omega - \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3)^2 \sin \varphi_4 \right] - I_2 \left[(\dot{\omega} - \ddot{\varphi}_1) \cos(\varphi_3 + \varphi_4) - (\omega - \dot{\varphi}_1)^2 \sin(\varphi_3 + \varphi_4) \right] = \\ & = (d_4 + b_{4\rho}) [X_{41} \sin \theta_2 + Y_{41} \cos \theta_2 + Y_{42}] - H_4 [X_{41} \cos \theta_2 + X_{42} - Y_{41} \cos \theta_2] + M_4 . \end{aligned} \quad (1)$$

У системі рівнянь (1) прийняті позначення: $m, I; m_1, I_1; m_2, I_2; m_3, I_3; m_4, I_4$ – відповідно маса і центральні моменти інерції ланок автопоїзда; $\vartheta, \vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \vartheta_4$ – курсові кути ланок автопоїзда; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – кути складання кінематично незалежних ланок автопоїзда; $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ – відповідно кути повороту керованих коліс першого, другого, третього автобусів; V, U – поздовжня і бічна проєкції швидкості центру мас на осі рухомої системи координат, безпосередньо пов'язаної з першим автобусом; $M_i = f(\varphi_i, \dot{\varphi}_i)$ – моменти опору повороту ланок метробуса; $X_{i,j}; Y_{i,j}$ – поздовжні і бічні реакції опорної поверхні на колеса осей автобусів; a – відстань від передньої осі до центру мас першого автобуса; b – відстань від задньої осі до центру мас першого автобуса; c – відстань від центру мас першого автобуса до точки зчипки з другим автобусом; b_1 – відстань від центру мас другого автобуса до його передньої осі; b_{12} – відстань від центру мас другого автобуса до його задньої осі; c_1 – відстань від центру мас другого автобуса до точки зчипки з першим автобусом; c_2 – відстань від точки зчипки першого і другого автобусів до задньої осі другого автобуса; b_2 – відстань від центру мас третього автобуса до його передньої осі; b_{22} – відстань від центру мас третього автобуса до його задньої осі; d_1 – відстань від центру мас першого автобуса до точки зчипки; d_2 – відстань від центру мас другого автобуса до точки зчипки з першим автобусом; d_3 – відстань від центру мас другого автобуса до точки зчипки з третім автобусом; d_4 – відстань від центру мас третього автобуса до точки зчипки з другим автобусом; l_1, l_2, l_3 – відповідно база першого, другого і третього автобусів.

Аналіз залежностей криволінійного руху автопоїзда, що описані системою рівнянь (1), дає чітку картину процесу повороту. Однак практично важливу задачу визначення положення його причіпних ланок на повороті він не розв'язує. Для цього необхідно знайти величини кутів складання, які визначають положення другого і третього автобуса на повороті.

Приймаючи до уваги відомі із кінематики залежності, а також результати роботи [14], отримаємо рівняння, що визначають кути складання ланок автопоїзда:

$$\begin{aligned} & \frac{d\varphi_1}{dt} + \frac{V_A}{L_0 \frac{\sin(\pi/2 - \varphi_2 - \alpha_1)}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \alpha_1)}} - \frac{V_{C1} \operatorname{tg} \theta_0}{a + b} = 0 ; \\ & \frac{d\varphi_2}{dt} - \frac{V_{C1} \sin(\pi/2 - \varphi_1)}{\frac{a_1 + b_1}{\operatorname{tg} \theta_0} \sin(\pi/2 - \varphi_2 - \alpha_1) \sqrt{1 + \left(\frac{L_1 - c_1}{a_1 + b_1} \operatorname{tg} \theta_1 \right)^2}} - \frac{V_A \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \alpha_1)}{L_1 \sin(\pi/2 - \varphi_1 - \alpha_1)} = 0 ; \\ & \frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{V_{C1} \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \alpha_1) L_1 \sin(\varphi_1 + \varphi_4 + \alpha_2)}{l_1 \sin \varphi_2 \sin(\pi/2 - \varphi_4 - \alpha_2)} \times \\ & \times \frac{\sin(\pi/2 - \varphi_2 - \alpha_1) \operatorname{tg} \varphi_1}{\frac{a_1 + b_1}{\operatorname{tg} \theta_2} \sqrt{1 + \left(\frac{d_1 - c_1}{a_1 + b_1} \operatorname{tg} \theta_0 \right)^2} + L_1 \frac{\cos \varphi_1}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \alpha_1)} - L_1 \sin(\pi/2 - \varphi_2 - \alpha_1) \operatorname{tg} \varphi_1} - \frac{V_{C1} \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \alpha_2)}{l_1 \sin(\pi/2 - \varphi_2 - \alpha_2)} = 0; \quad (2) \\ & \frac{d\varphi_4}{dt} - \frac{V_{C1} \operatorname{tg} \varphi_1 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \alpha_1)}{\frac{a_2 + b_2}{\operatorname{tg} \theta_2} \sin(\pi/2 - \varphi_2 - \alpha_2) \sqrt{1 + \left(\frac{l_2 - c_2}{a_2 + b_2} \operatorname{tg} \theta_2 \right)^2}} - \frac{V_{C1} \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \alpha_1) \sin(\varphi_1 + \varphi_4 + \alpha_2)}{l_2 \sin \varphi_2 \sin(\pi/2 - \varphi_4 - \alpha_2)} = 0. \end{aligned}$$

У системі рівнянь (2) допоміжні кути α_1 , α_2 , визначені залежностями:

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{l_1 + c_1}{a_1 + b_1} \operatorname{tg} \theta_1\right) ; \quad \alpha_2 = \arctg\left(\frac{l_2 + c_2}{a_2 + b_2} \operatorname{tg} \varphi_2\right) ;$$

відповідні кути складання ланок автопоїзда:

$$\varphi_1 = \arctg\left[\frac{l_1 \sin(\varphi_2 + \varphi_1 + \alpha_1)}{L_1 \sin(\pi/2 - \varphi_2 - \alpha_1)}\right] \times \frac{1}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{\left[\frac{\sin(\pi/2 - \varphi_2 - \alpha_1)}{\sin(\varphi_2 + \varphi_1 + \alpha_1)} \right]^2 + 1 - \left[\frac{\sin(\pi/2 - \varphi_1)}{\sin(\varphi_2 + \varphi_1 + \alpha_1)} \right]^2}{2 \times \frac{\sin(\pi/2 - \varphi_2 - \alpha_1)}{\sin(\varphi_2 + \varphi_1 + \alpha_1)}} \right\}^2}} ;$$

$$\varphi_2 = \arctg\left[\frac{L_2 \sin(\gamma_4 + \gamma_3 + \alpha_2)}{l_2 \sin(\pi/2 - \gamma_4 - \alpha_2)}\right] \times \frac{1}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{\left[\frac{\sin(\pi/2 - \gamma_4 - \alpha_2)}{\sin(\gamma_4 + \gamma_3 + \alpha_2)} \right]^2 + 1 - \left[\frac{\sin(\pi/2 - \gamma_3)}{\sin(\gamma_4 + \gamma_3 + \alpha_2)} \right]^2}{2 \times \frac{\sin(\pi/2 - \gamma_4 - \alpha_2)}{\sin(\gamma_4 + \gamma_3 + \alpha_2)}} \right\}^2}} ;$$
(3)

У системах рівнянь (2–3) прийняті такі позначення:

$L_0 = L_1 = L_2$ – база автобуса, для всіх автобусів однакова, $L_0 = L_1 = L_2 = 4270$ мм;

$l_1 = l_2$ – відстань від точки зчипки першого автобуса з другим, другого автобуса з третім, $l_1 = l_2 = 3700$ мм;

$a = a_1 = a_2$ – відстань від центру мас автобуса до його передньої осі, $a = a_1 = a_2 = 2732$ мм;

$b = b_1 = b_2$ – відстань від центру мас автобуса до його задньої осі, $b = b_1 = b_2 = 1538$ мм;

$c_1 = c_2$ – відстань від центру мас автобуса до точки зчипки з наступним, $c_1 = c_2 = 5750$ мм. (4, 5).

Кут повороту керованих коліс першого автобуса при виконанні неусталеного повороту автопоїздом змінювався в таких межах [14]:

$$\theta_0 = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < t \leq t_0 \\ \beta t & \text{при } t_0 < t \leq t_1 \\ \theta_{0\max} & \text{при } t_1 < t \leq t_2 \\ -\beta t & \text{при } t_2 < t \leq t_3 \\ 0 & \text{при } t > t_3 \end{cases} ;$$
(4)

де β – рівномірна швидкість повороту керованих коліс першого автобуса;

$[0; t_0]$ і $[t_3; t_k]$ – час руху автопоїзда по прямій відповідно до входу в поворот і після виходу із повороту;

$[t_0; t_1]$ – інтервал часу входження в поворот, керовані колеса першого автобуса рівномірно повертаються зі швидкістю $\beta = 0,05$ с⁻¹;

$[t_1; t_2]$ – інтервал часу руху автопоїзда по колу (може бути відсутнім);

$[t_2; t_3]$ – інтервал часу виходу автопоїзда із повороту (керовані колеса першого автобуса рівномірно повертаються у нейтральне положення).

Оскільки при повороті триланкових автопоїздів спостерігається ситуація, коли перший автобус вже майже виконав поворот, а третій автобус лише його розпочинає, то більш доцільно визначати зміщення траєкторій головних точок другого і третього автобуса, а потім будувати габаритну смугу руху автопоїзда. Із застосуванням розробленої методики з використанням програмного забезпечення Mathcad були визначені кути складання та зміщення траєкторій головних точок причіпних ланок автобусного поїзда. При цьому при повороті на 90° режимний коефіцієнт повороту приймався в межах 0,005, а при коловому русі – 0,3. Результати розрахунків представлені на рисунках 2–3.

На рисунку 2 наведені результати розрахунку кутів складання ланок автопоїзда і кутів повороту керованих коліс другого і третього автобуса у функції кута повороту керованих коліс першого автобуса.

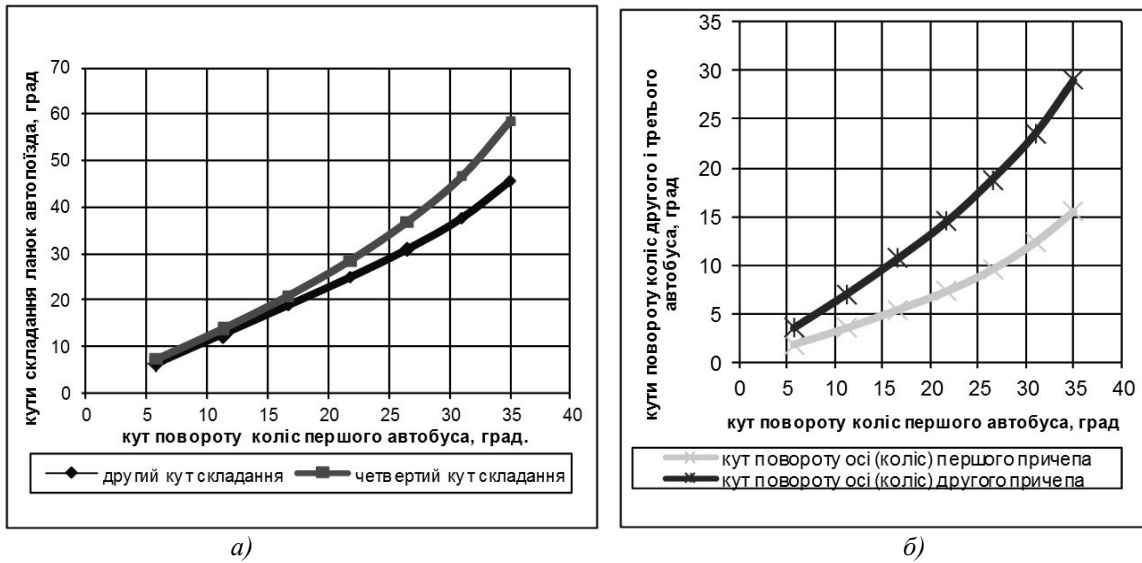


Рис. 2. Залежність кутів складання (а), повороту коліс другого і третього автобуса (б) від кута повороту керованих коліс першого автобуса

На рисунку 3 наведені зміщення траєкторій головних точок другого і третього автобуса на вході в поворот (а) і максимальні зміщення (б) по відношенню до головної точки першого автобуса під час колового руху автопоїзда.

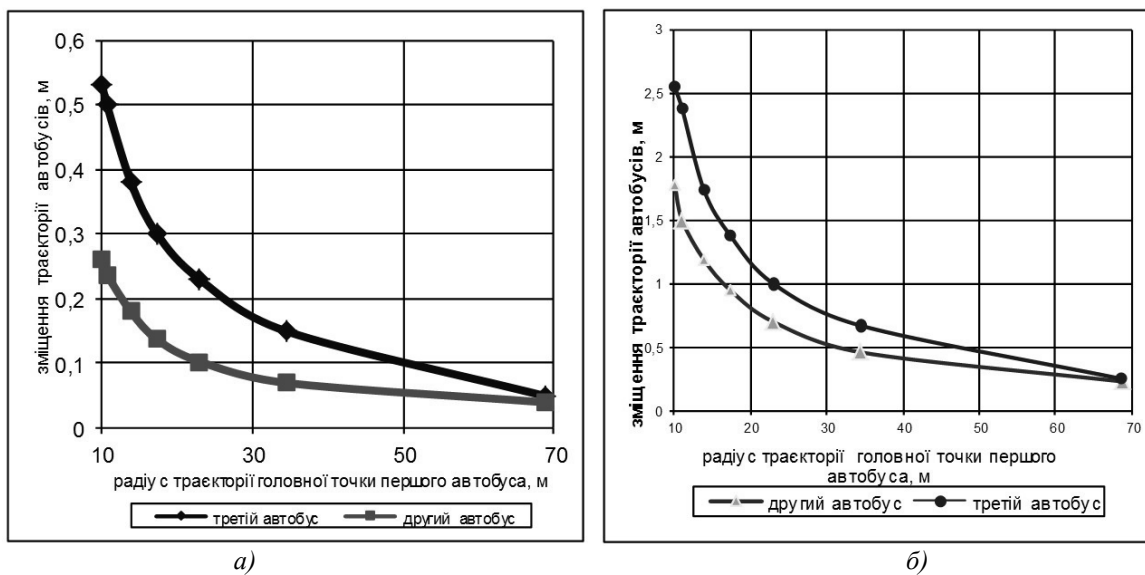


Рис. 3. Зміщення траєкторій головних точок другого і третього автобуса на вході в поворот (а) і максимальне зміщення (б) по відношенню до головної точки першого автобуса під час колового руху автопоїзда

За величинами зміщення траєкторій головних точок другого і третього автобусів була побудована траєкторія руху автобусного поїзда при повороті на 90^0 (рис. 4).

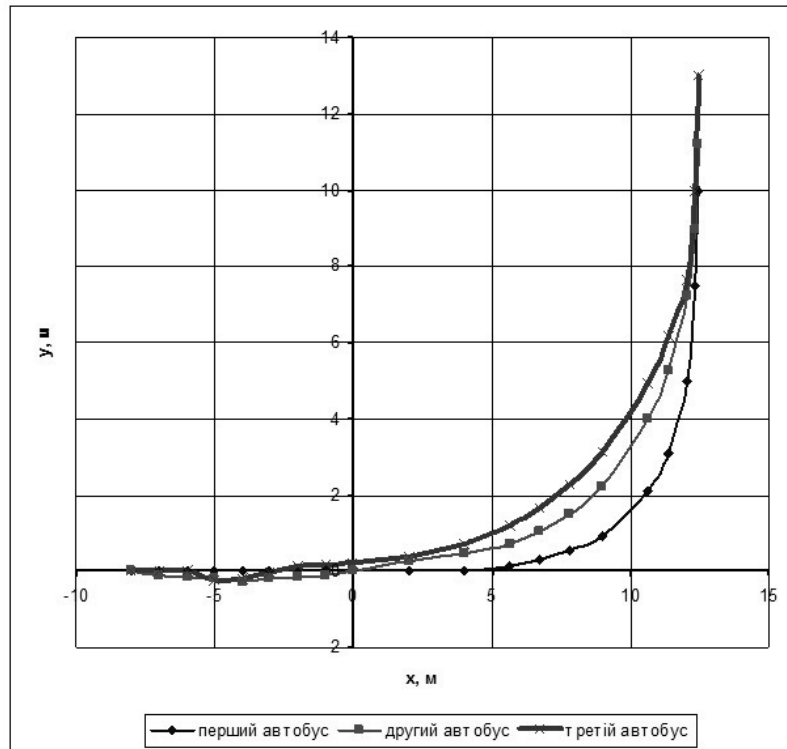


Рис. 4. Траєкторія руху автобусного поїзда при повороті на 90°

Кути складання ланок і повороту керованих осей автобусів доцільно визначати за колового руху автопоїзда. У цьому випадку розрахункові формули для визначення кутів складання і кутів повороту керованих осей другого і третього автобусів (причепів) визначаються геометричними параметрами ланок і задаючим параметром – кутом повороту керованих коліс першого автобуса. Якщо для автобусного поїзда як задаючий параметр прийняти кут повороту керованих коліс першого автобуса, то кути складання та кути повороту керованих коліс другого та третього автобусів визначаються як:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \arcsin \frac{L_1^2 + c_1^2 - b^2}{2L_1 \sqrt{L_1^2 \operatorname{ctg}^2 \theta_0 + c_1^2}} - \operatorname{arctg} \frac{c_1}{L_2 \operatorname{ctg} \theta_0}; \\ \varphi_2 &= \arcsin \frac{L_1^2 - c_1^2 + b^2}{2L_1 \sqrt{L_2^2 \operatorname{ctg}^2 \theta_0 + b^2}} + \operatorname{arctg} \frac{b}{L_2 \operatorname{ctg} \theta_0}; \\ \varphi_3 &= \arcsin \frac{L_2^2 + c_2^2 - b_1^2}{2L_2 \sqrt{L_1^2 \operatorname{ctg}^2 \theta_1 + c_2^2}} - \operatorname{arctg} \frac{c_2}{L_1 \operatorname{ctg} \theta_1}; \\ \varphi_4 &= \arcsin \frac{L_2^2 - c_1^2 + b_1^2}{2L_2 \sqrt{L_1^2 \operatorname{ctg}^2 \theta_2 + b_1^2}} + \operatorname{arctg} \frac{b_1}{L_1 \operatorname{ctg} \theta_2}; \\ \theta_1 &= \operatorname{arctg} \frac{L_1}{L_2 \operatorname{ctg} \theta_0}; \quad \theta_2 = \operatorname{arctg} \frac{L_2}{L_1 \operatorname{ctg} \theta_1}. \end{aligned} \quad (5)$$

За отриманими кутами складання інтегрування системи рівнянь (1) виконано за вихідних даних для автобуса MA3-206 з використанням програмного забезпечення Maple 14. На рисунку 5 наведена габаритна смуга руху автобусного поїзда, що складається з трьох автобусів MA3-206.

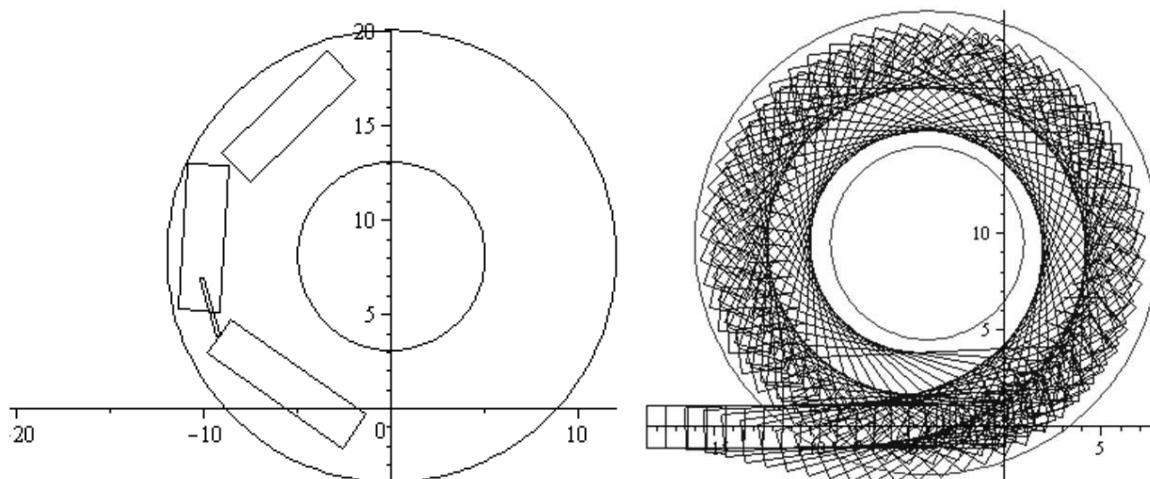


Рис. 5. Габаритна смуга руху автобусного поїзда із трьох автобусів МАЗ-206

Відповідно до рисунка 5, автобусний поїзд із трьох автобусів МАЗ-206 задовольняє вимоги нормативних документів із незначним запасом, незважаючи на його довжину на рівні 28,4 м.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведеними дослідженнями кінематики повороту триланкового автобусного поїзда, що складається із трьох однотипних автобусів, зокрема МАЗ-206, встановлено:

- при неграничному повороті поворот усіх автобусів здійснюється на першій стадії послідовно, причому третій автобус забігає більш інтенсивно у внутрішню сторону повороту, збільшуючи другий кут складання порівняно з першим і четвертий, порівняно з третім. При цьому усі кути складання суттєво залежать від режиму криволінійного руху автопоїзда. Зі зменшенням режимного коефіцієнта повороту зменшуються і кути складання ланок автопоїзда φ_2 і φ_4 при одному і тому ж значенні приведенного кута повороту θ_0 керованих коліс першого автобуса, оскільки автобусний поїзд займає при цьому менш «складене» положення;

- під час усталеного колового руху автопоїзд у складі трьох автобусів МАЗ-206 забезпечує нормовані значення габаритної смуги руху. Позитивним при цьому також є те, що для автобусів зі стандартними системами керування їх відносна кутова швидкість суттєво зменшується і поліпшується стійкість автопоїзда під час виконання повороту.

Для впровадження результатів роботи у створення триланкових пасажирських автопоїздів варто вирішити ще ряд завдань, зокрема розробити систему управління двигуном, трансмісією, гальмами і рульовим керуванням, а також обрати маршрути їх руху і режими роботи (робота трьох автобусів у зчіпці, робота двох автобусів у зчіпці, робота одного автобуса). Вирішенню цих питань будуть присвячені подальші дослідження.

Список використаної літератури:

1. Поляков В.М. Триланкові автопоїзди. Маневреність : монографія / В.М. Поляков, В.П. Сахно. – Луганськ : Ноулідж, 2014. – 206 с.
2. Сахно В.П. Маневреність триланкового метробуса / В.П. Сахно, В.М. Поляков, О.Є. Омельницький // Новітні технології розвитку автомобільного транспорту : наук. прац. Міжн. наук.-прак. конф. – ХНАДУ ; Науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України. – 2018. – С. 305–308.
3. Вплив конструктивних і експлуатаційних факторів на показники маневреності метробуса / В.П. Сахно, В.М. Поляков, С.М. Шарай, О.Є. Омельницький // Вісник ЖДТУ. – 2018. – № 2 (77). – С. 248–256.
4. Sakhno V.P. Study of long haul truck movement along the curvilinear trajectory while steering a carryall semi-trailer – container by braking the wheels of one axle / V.P. Sakhno, M.M. Marchuk, R.M. Marchuk // INMATEN – Agricultural Engineering. – INMA Bucharest : National institute of research-development for machines and installations designed to agriculture and food industry. – 2016. – Vol. 49, № 2.
5. Comparative evaluation of maneuverability of large and extra large class buses / V.Sakhno, I.Murovany, S.Sharai, V.Seleznev // Mobile machines. International scientific conference. – Kaunas, Lithuania : Aleksandras Stulginskis University. – 2017. – P. 38–47.
6. Маневреність метробусів / В.П. Сахно, В.В. Біліченко, В.М. Поляков, О.Є. Омельницький // Вісник машинобудування та транспорту : науковий журнал. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – № 2 (6). – С. 131–140.
7. Improving of transitway operating properties / V.Sakhno, I.Murovanyi, V.Poliakov, S.Sharai // ICCPT 2019: Current Problems of Transport: Proceedings of the 1st International Scientific Conference, May 28-29, Ternopil, Ukraine, P. 133–140.

8. Mobility of the metrobus. Ways of improvement / O.Z. Bundza, V.P. Sakhno, V.M. Poliakov, D.M. Yachenko // The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. – Warszawa, Poland. – 2020. – № 89 (3). – P. 61–73.
9. Michalek M.M. Modular Kinematic Modelling of Articulated Buses / M.M. Michalek, B.Patkowski, T.Gawron // IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY. – 2020. – Vol. 69, № 8, AUGUST. – 8381 p.
10. Michalek M. Non-minimum-phase property of N-trailer kinematics resulting from off-axle interconnections / M.Michalek // Int. Journal of Control. – 2015. – № 86 (4). – P. 740–758.
11. Altafini C. Some properties of the general n-trailer / C.Altafini // Int. Journal of Control. – 2001. – № 74 (4). – P. 409–424.
12. Wang D. Big Trajectory Data Mining: A Survey of Methods, Applications, and Services / Di Wang, Tomio Miwa, Takayuki Morikawa // Sensors (Basel). – 2020. – Aug, № 20 (16). – 4571 p. DOI: 10.3390/s20164571.
13. Michalek M.M. Modular tracking controller for N-trailers with non-zero hitching offsets / M.M. Michalek // The paper presented during 2015 American Control Conference. – Chicago, USA : AACC. – 2015. – pp. 5371–5376.
14. Шарнірно-зчленовані автобуси. Маневреність та стійкість : монографія / В.П. Сахно, В.М. Поляков, С.М. Шапай та ін. – Луцьк : ІВВ Луцького НТУ, 2021. - 288 с.

References:

1. Poljakov, V.M. and Sakhno, V.P. (2014), *Trylankovi avtopoi'zdy. Manevrenist'*, monografija, Noulidzh, Lugans'k, 206 p.
2. Sakhno, V.P., Poljakov, V.M. and Omel'nyckyj, O.Je. (2018), «Manevrenist' trylankovogo metrobusa», *Novitni tehnologii' rozvytku avtomobil'nogo transportu*, nauk. prac. Mizhn. nauk.-prak. konf., HNADU, Naukovo-doslidnyj ekspertno-kryminalistychnyj centr MVS Ukrainy, pp. 305–308.
3. Sakhno, V.P., Poljakov, V.M., Sharaj, S.M. and Omel'nyckyj, O.Je. (2018), «Vplyv konstruktyvnyh i eksploatacijnyh faktoriv na pokaznyky manevrenosti metrobusa», *Visnyk ZhDTU*, No. 2 (77), pp. 248–256.
4. Sakhno, V.P., Marchuk, M.M. and Marchuk, R.M. (2016), «Study of long haul truck movement along the curvilinear trajectory while steering a carryall semi-trailer – container by braking the wheels of one axle», *INMATEN – Agricultural Engineering*, National institute of research-development for machines and installations designed to agriculture and food industry, INMA Bucharest, Vol. 49, No. 2.
5. Sakhno, V., Murovany, I., Sharai, S. and Seleznev, V. (2017), «Comparative evaluation of maneuverability of large and extra large class buses», *Mobile machines. International scientific conference*, Aleksandras Stulginskis University, Lithuania, Kaunas, pp. 38–47.
6. Sakhno, V.P., Bilichenko, V.V., Poljakov, V.M. and Omel'nyckyj O.Je. (2018), «Manevrenist' metrobusisv», *Visnyk mashynobuduvannja ta transportu*, naukovyj zhurnal, VNTU, Vinnycja, No. 2 (6), pp. 131–140.
7. Sakhno, V., Murovanyi, I., Poliakov, V. and Sharai, S. (2019), «Improving of transitway operating properties», *ICCPT 2019: Current Problems of Transport*, Proceedings of the 1st International Scientific Conference, May 28–29, Ternopil, Ukraine, pp. 133–140.
8. Bundza, O.Z., Sakhno, V.P., Poliakov, V.M. and Yachenko, D.M. (2020), «Mobility of the metrobus. Ways of improvement», *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, Poland, Warszawa, No. 89 (3), pp. 61–73.
9. Michalek, M.M., Patkowski, B. and Gawron T. (2020), «Modular Kinematic Modelling of Articulated Buses», *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, Vol. 69, No. 8, AUGUST, 8381 p.
10. Michalek, M. (2015), «Non-minimum-phase property of N-trailer kinematics resulting from off-axle interconnections», *Int. Journal of Control*, No. 86 (4), pp. 740–758.
11. Altafini, C. (2001), «Some properties of the general n-trailer», *Int. Journal of Control*, No. 74 (4), pp. 409–424.
12. Wang, Di, Tomio Miwa and Takayuki Morikawa (2020), «Big Trajectory Data Mining: A Survey of Methods, Applications, and Services», *Sensors (Basel)*, Aug, No. 20 (16), 4571 p, doi: 10.3390/s20164571.
13. Michalek, M.M. (2015), «Modular tracking controller for N-trailers with non-zero hitching offsets», *The paper presented during 2015 American Control Conference*, AACC, USA, Chicago, pp. 5371–5376.
14. Sakhno, V.P., Poljakov, V.M., Sharaj, S.M. et al. (2021), *Sharnirno-zchlenovani avtobusy. Manevrenist' ta stijkist'*, monografija, IVV Luc'kogo NTU, Luc'k, 288 p.

Сахно Володимир Прохорович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Автомобілі» Національного транспортного університету.

<https://orcid.org/0000-0002-5144-7131>.

Наукові інтереси:

– дослідження експлуатаційних властивостей автотранспортних засобів.

E-mail: svp_40@ukr.net.

Поляков Віктор Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри «Автомобілі» Національного транспортного університету.

<https://orcid.org/0000-0001-7042-3066>.

Наукові інтереси:

– дослідження експлуатаційних властивостей автотранспортних засобів.

E-mail: poljakov_2006@ukr.net.

Шарай Світлана Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри «Міжнародні перевезення та митний контроль» Національного транспортного університету.

<https://orcid.org/0000-0001-6568-4990>.

Наукові інтереси:

- транспортна логістика;
- міжнародні перевезення вантажів.

E-mail: svetasharai@gmail.com.

Мурований Ігор Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету транспорту та механічної інженерії Луцького національного технічного університету.

<https://orcid.org/0000-0001-6568-4990>.

Наукові інтереси:

- маневреність і стійкість руху автопоїздів;
- організація перевезень пасажирів і вантажів.

E-mail: igor_intu@ukr.net.

Sakhno V.P., Poliakov V.M., Sharai S.M., Murovany I.S.

Study of the maneuverability of a three-link trailer bus train

The metrobus or new Bus Rapid Transport (BRT) bus system is the result of the development of the bus public transport network. Compared to the metro, this project has clear advantages: the lower cost of creating a network, the lower cost of rolling stock, mobility, etc. Along with the undeniable advantages of three-link articulated buses and trolleybuses, there are some disadvantages, i.e. the worst maneuverability and stability of traffic compared to two-link ones. In addition, the efficiency of the operation of such machines is closely related to passenger traffic, which can change significantly during the day. Therefore, a road train consisting of two (or three) buses or trolleybuses operating in a coupling, the passenger capacity of which is similar to articulated buses and trolleybuses, can become promising. During peak hours, a bus train operates, and during the inter-peak period, each bus is separate (one bus can be parked at a dedicated site).

For such a bus train consisting of three buses of the same type (using the example of MAZ-206), maneuverability indicators were determined, in particular, it was shown that with a non-boundary turn, all buses turn at the first stage sequentially, with the third bus running more intensively to the inside of the turn, increasing the second folding angle compared to the first and fourth compared to the third. With a steady circular movement, a road train consisting of three buses MAZ-206 provides standardized values of the overall lane. It is also positive that for buses with standard control systems, their relative angular speed is significantly reduced and the stability of the road train is improved during the turn.

Keywords: maneuverability; bus; a bus train; folding angle; rotation angle; turning; overall lane.

Стаття надійшла до редакції 18.05.2022.