

© В. В. Донець, магістр,
e-mail: nerik2008@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-2353-0699;
© В. М. Поляков, канд. техн. наук, доцент,
професор кафедри автомобілів,
e-mail: poljakov_2006@ukr.net,
ORCID: 0000-0001-7042-3066;
© В. П. Сахно, докт. техн. наук, професор, за-
відувач кафедри автомобілів,
e-mail: sakhno@ntu.edu.ua,
ORCID: 0000-0002-5144-7131;
© Г. А. Філіпова, канд. техн. наук, доцент,
професор кафедри автомобілів,
e-mail: galina_gaj@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-3427-7633;
© С. М. Шарай, канд. техн. наук, доцент, про-
фесор кафедри міжнародних перевезень та
митного контролю,
e-mail: svetasharai@gmail.com,
ORCID: 0000-0001-6568-4990
Національний транспортний університет

© Veronika Donets, Magistre of Transport,
Postgraduate Student of Automobiles Depart-
ment, e-mail: nerik2008@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-2353-0699;
© Viktor Poljakov, PhD in Technical Science,
Associate Professor, Professor of Automobiles
Department, e-mail: poljakov_2006@ukr.net,
ORCID: 0000-0001-7042-3066;
© Volodymyr Sakhno, Doctor in Technical
Science, Professor, Head of Automobiles
Department, e-mail: sakhno@ntu.edu.ua,
ORCID: 0000-0002-5144-7131;
© Galyna Filipova, PhD in Technical Science,
Associate Professor, Professor, Automobiles
Department, e-mail: galina_gaj@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-3427-7633;
© Svitlana Sharai, PhD in Technical Science,
Associate Professor, Professor, Department of
International Transport and Customs Control,
e-mail: svetasharai@gmail.com,
ORCID: 0000-0001-6568-4990
National Transport University

МАНЕВРЕНІСТЬ 15-МЕТРОВОГО АВТОБУСА

MANEUVERABILITY OF THE 15-METER BUS

Анотація. Автобуси відіграють значну роль у системі громадського транспорту та, зокрема, у виконанні перевезень пасажирів у міжміському сполученні. Це найпоширеніший спосіб переміщення людей на короткі та середні відстані як у містах, так і в більшості сільських районів. Автобусобудування, як частина загального автомобілебудування, має свою характерну особливість: незважаючи на те, що загальний випуск автобусів становить лише одиниці відсотків від загального випуску автомобільної техніки, їхнє виробництво здійснюється на значно більшій кількості підприємств порівняно із виробництвом легкових і навіть вантажних автомобілів, і дуже часто обмеженими партіями. Ідея застосування надвеликих автобусів є доцільною, оскільки існує ряд міських маршрутів, на яких застосування 12-метрових автобусів призведе до їхнього перевантаження, а використання 18-метрових зчленованих автобусів може призвести до їхнього недозавантаження, або до збільшення інтервалів руху.

У процесі розробки будь-якого автобуса, зокрема й надвеликої місткості, повинні бути враховані масові та геометричні обмеження, закладені в нормативних документах. При цьому 15-метровий тривісний міський автобус без спеціальних пристроїв не може задовольнити вимог ДСТУ через свою збільшену довжину. Тому актуальним і на сьогодні є поліпшення вписуваності таких автобусів у транспортну мережу великих міст. Цю проблему можна вирішити шляхом управління не тільки передніми, а й задніми колесами автобуса. У роботі показано, що керування автобусом надвеликої місткості може здійснюватися не тільки кінематичним способом – поворотом керованих коліс автобуса, а й комбінованим способом – керуванням керованих коліс автобуса та його тягових (ведучих) коліс шляхом створення різних за величиною крутних моментів на колесах цієї осі або створенням гальмівних моментів на третій осі, що може значно спростити систему управління автобусом. Водночас отримана залежність різниці крутних моментів на колесах тягової (ведучої) осі автобуса, гальмівних моментів на колесах третьої осі й сумарних моментів на другій (ведучій) і третій осях автобуса, що є еквівалентним куту повороту керованих коліс автобуса. Для різних способів управління встановлено, що автобус за кінематичного способу управління (поворот керованих коліс автобуса – система управління) не відповідає вимогам Правил №36.03 ЄЕК ООН щодо маневреності. За комбінованого способу управління автобусом за величини різниці моментів на колесах другої і третьої осі в межах $M=2550-3000$ Нм ці вимоги виконуються, причому найкращою за конструкцією є система управління, в якій застосовується гальмування коліс третьої осі. Проте такий спосіб повороту може бути запропонований тільки для поліпшення маневреності на незначних швидкостях руху (до 10 м/с). За умови збільшення швидкості руху понад 10 м/с систему управління колесами третьої осі слід блокувати.

Ключові слова: тривісний автобус, система управління, гальмівний момент, маневреність, габаритна смуга руху, радіус повороту, швидкість.

Abstract. Buses play a significant role in the public transport system and, in particular, in the transportation of passengers in intercity traffic. This is the most common way of moving people over short and medium distances both in cities and in most rural areas. The bus industry as a part of the general automotive industry has its own characteristic feature: despite the fact that the total production of buses is only a few percent of the total output of automotive equipment, their production is carried out at a much larger number of enterprises than cars and even trucks, and very often in limited quantities. The idea of using extra-large buses seems appropriate, because there are a number of city routes on which the use of 12-meter buses will lead to their overload, and the use of 18-meter articulated buses can lead to their underloading, or to increase the intervals of traffic.

When developing any bus, including an extra-large capacity bus, the mass and geometric limitations laid down in the regulatory documents must be taken into account. At the same time, a 15-meter three-axle city bus without special devices cannot meet the requirements of GOST due to its increased length. Therefore, it is still relevant today to improve the fitting of such buses into the transport network of large cities. This problem can be solved by controlling not only the front but also the rear wheels of the bus. The paper shows that the control of an extra-large capacity bus can be carried out not only by a kinematic method – by turning the steered wheels of the bus, but also in a combined method – by controlling the steered wheels of the bus and its driving wheels by creating different torques on the wheels of this axis or by creating braking moments on the third axis, which can significantly simplify the bus control system. At the same time, the dependence of the difference in the torques on the wheels of the driving axle of the bus, the braking moments on the wheels of the third axle and total moments on the second (driving) and third axles of the bus was obtained, which is equivalent to the angle of rotation of the steered wheels of the bus. For different control methods, it has been established that the bus according to the kinematic control method (turning the steered wheels of the bus – the control system) does not meet the requirements of UNECE Regulation No. 36.03 regarding maneuverability. With the combined method of bus control for the magnitude of the difference in moments on the wheels of the second and third axles within $\Delta M=2550-3000$ Nm, these requirements are met, and the preferred design is the control system, which uses the braking of the wheels of the third axle. However, this method of turning can only be proposed to improve maneuverability at low speeds (up to 10 m/s). When the speed increases above 10 m/s, the wheel control system of the third axle should be blocked.

Keywords: three-axle bus, control system, braking torque, maneuverability, overall traffic lane, turning radius, speed.

Вступ

Автобуси відіграють значну роль у системі громадського транспорту та між-міському сполученні. Це найпоширеніший спосіб переміщення людей на короткі та середні відстані як у містах, так і в більшості сільських районів. Автобуси є основним видом зручного переміщення людей на великі відстані для більшої частини населення світу. Так, автобуси становлять 55% громадського транспорту в Європі, понад 45% всього пасажирського транспорту в Туреччині та забезпечують 751 млн пасажирських подорожей щорічно у США. На відстані від 500 до 1000 км автобуси мають найнижчу вартість на пасажирів будь-якого виду транспорту [1].

Автобусобудування, як частина загального автомобілебудування, має свою характерну особливість: незважаючи на те, що загальний випуск автобусів складає лише одиниці відсотків від загального випуску автомобільної техніки, їхнє виробництво здійснюється на значно більшій кількості підприємств, ніж легкових і навіть вантажних автомобілів, дуже часто обмеженими партіями.

Ідея застосування надвеликих автобусів, рис. 1, є доцільною, оскільки дає змогу економити, а саме [2]:

- автобус має меншу габаритну довжину порівняно зі зчленованим, а тому займає менше місця на дорозі та на зупинці, хоча його пасажиромісткість ненабагато менша;

- відсутність причіпної ланки спрощує керування таким автобусом;

- за відсутності вузла зчленування в такого автобуса спрощені його електрообладнання, система опалення, гальмова система тощо, загалом знижене число деталей, що призводить до зниження вартості автобуса на 30–35% порівняно зі зчленованим автобусом;

- існують міські маршрути, на яких застосування 12-метрових автобусів призведе до їхнього перевантаження, а використання 18-метрових зчленованих автобусів може призвести до недозавантаження автобусів або до збільшення інтервалів руху.



Рис. 1. Автобус надвеликої місткості

У розробці будь-якого автобуса, зокрема й надвеликої місткості, мають бути враховані масові та геометричні обмеження, закладені в нормативних документах. Так, згідно з ДСТУ UN/ECE R 36-03:2002 «Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження пасажирських транспортних засобів великої місткості стосовно загальної конструкції» [2] внутрішній радіус повороту повинен становити 5,3 м, а найбільш виступальна від центра повороту точка автобуса має описувати дугу радіусом 12,5 м. Крім того, навантаження на тягову (ведучу) вісь не повинне перевищувати 10 т (у міських пасажирських перевезеннях допускається 11,5 т), на передню керовану вісь – 6-7 т, навантаження на тягову (ведучу) вісь має забезпечувати її контакт з дорогою з коефіцієнтом зчпної маси не нижчим за 0,25. При цьому 15-метровий тривісний міський автобус без спеціальних пристроїв не відповідає вимогам ДСТУ через збільшену довжину. Тому актуальним і на сьогодні є поліпшення вписуваності таких автобусів у транспортну мережу великих міст.

Аналіз останніх публікацій

В умовах розрізненості виробництва й обмеженості випуску за широкою гамою типорозмірів і модифікацій важлива роль належить швидкому створенню конструкцій, що можливо лише за умови широкої уніфікації автобусів. Наприклад, сімейство міських і приміських автобусів німецької фірми Neoplan. Воно складається із ряду моделей уніфікованих низько

підлогових автобусів довжиною від восьми до 18 м, пасажиромісткістю від 46 до 176 пасажирів. Причому фірма першою у світовій практиці застосувала одиночний міський тривісний автобус особливо великої місткості з другою тяговою (ведучою) і третьою керованою віссю зі своїм приводом. Така конструкція забезпечує маневреність одиночного автобуса на рівні шарнірно-зчленованого, що відповідає вимогам Правил №36.03 ЄЕК ООН, але через відмову від гнучкого з'єднання ланок між собою його вартість на 15–20% менша. Водночас значно нижчими є експлуатаційні витрати [1].

Польська фірма Solaris випускає сімейство автобусів довжиною від 9 до 18 м, причому найбільший приріст приходить на 15-метровий автобус Urbino 15, який відрізняється від автобуса Neoplan відсутністю активної системи керування третьою віссю: тут третя вісь – самовстановлювальна. Така конструкція значно дешевша, ніж у разі третьої осі з активним кермовим управлінням. У підсумку вартість одиночного автобуса стає нижчою за вартість шарнірно-зчленованого на 30–35% [1].

За розглянутими двома принципово різними схемами управління третьою віссю випускають практично всі 15-метрові автобуси, які є конкурентноспроможними шарнірно-зчленованим автобусам. Дизайн шарнірно-зчленованих автобусів (ШЗА) є предметом інтересу в поточних дослідженнях як із погляду управління [1], так і сталої мобільності [2]. Щодо ШЗА, у яких двигун розташований у задній частині причепа, контроль стійкості має велике практичне значення, оскільки виникнення нестійких коливань на зразок «складання ланок» може призвести до втрати контролю та нещасних випадків. Основне призначення функцій контролю стійкості, які в ЄС є обов'язковими з 2014 року, – унеможливити перекидання та нестійкість у русі [3], для чого встановлені експериментальні процедури випробувань ШЗА ще понад тридцять років тому [4]. Так, у роботі [5] показано, що через зміну швидкості руху в ШЗА можуть виникнути два види нестійкості: або дивергенція, або біфуркація

Хопфа. За допомогою біфуркаційного аналізу показано, що система в будь-якому разі має критичну постбіфуркаційну поведінку, це означає, що рух транспортного засобу може стати нестійким навіть у лінійно стійкій області швидкості руху, якщо збурення досить велике. Цього позбавлені 15-метрові автобуси, які за своєю пасажиромісткістю несуть поступуються шарнірно-зчленованим, проте за маневреністю таки відчутно поступуються їм. Маневреністю АТЗ називають сукупність властивостей, які забезпечують безперешкодний рух на опорній поверхні, обмеженій як за площею, так і за формою [8]. Такими обмеженнями в русі АТЗ можуть бути просторові, пов'язані з довжиною і висотою транспортного засобу, а також обмеження за формою та розмірами дорожнього полотна, що слугує опорною поверхнею для кочення коліс його ланок.

У роботі [6] зазначено, що вимірювачі й показники маневреності АТЗ можуть бути істотно поліпшені завдяки повороту осей (колес) причіпної ланки відносно його поздовжньої осі за допомогою тієї або іншої системи керування поворотом. Це повною мірою стосується і тривісних 15-метрових автобусів із задньою керованою або самовстановлювальною віссю. Керування ШЗА може бути здійснене не тільки кінематичним способом – поворотом керованих коліс автобуса і причепа, а й комбінованим способом – керуванням керованих коліс автобуса і тягових (ведучих) коліс автобуса шляхом створення різних за величиною крутних моментів на колесах цієї осі або створенням гальмівних моментів на третій осі, що може значно спростити систему його управління.

Метою роботи є поліпшення маневреності 15-метрового автобуса завдяки динамічному способу управління його колесами.

Основна частина

Для математичного опису плоскопаралельного руху автобуса введемо такі спрощення та припущення [6]:

- гіроскопічні моменти та неврівноважені моменти частин, які обертаються, не враховуються;

- в шарнірах рульового приводу відсутні люфти;
- автомобіль рухається на рівній горизонтальній поверхні;
- розглядається пласка «велосипедна» схема автомобіля; кути повороту зовнішнього θ' і внутрішнього θ'' коліс рівні між собою, тобто

$$\theta' = \theta'' = \theta; \quad (1)$$

- основною траєкторією є траєкторія центра мас;
- взаємодія коліс з опорною поверхнею в бічному напрямку описується через реакцію полотна дороги як функція кута відведення нелінійною гіпотезою [6]:

$$Y = k_1\delta^1 - k_2\delta^3 + k_3\delta^5 \dots; \quad (2)$$

- коефіцієнт опору бічному відведенню k визначений як [6]:

$$k = k_0 \frac{\sqrt{1 - (X / (\varphi G))^2}}{1 + 0,375 X / G}, \quad (3)$$

де k_0 – коефіцієнт опору бічному відведенню у випадку відсутності поздовжніх сил на колесі;

G – вертикальне навантаження на колесо;

- стабілізаційні моменти шин також описані як нелінійна залежність від кута відведення:

$$M_{cT} = \sigma_1\delta^1 - \sigma_2\delta^3 + \sigma_3\delta^5 \dots; \quad (4)$$

де $k_1, k_2, k_3, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – приведені характеристики шин коліс осі ККМ;

- момент в'язкого тертя в рульовому керуванні пропорційний куту повороту керованих коліс:

$$M_1 = h_1 \times \dot{\theta}; \quad (5)$$

де h_1 – коефіцієнт в'язкого тертя в деталях рульового керування;

- момент пружності в рульовому керуванні пропорційний куту повороту керованих коліс:

$$M_{p1} = \chi_1 \times \dot{\theta}, \quad (6)$$

де χ_1 – коефіцієнти жорсткості рульового приводу.

Кути бічного відведення коліс осей автобуса мають такий вигляд [6]:

- для керівного колісного модуля автобуса:

$$\frac{(\overline{V_{co}})_{y_0}}{(\overline{V_{co}})_{x_0}} = \operatorname{tg}(\theta - \delta_1),$$

$$\delta_1 = \theta - \operatorname{arctg} \frac{u + \omega(a - c \cdot \cos \theta) - c \cdot \dot{\theta} \cos \theta}{V + c(\omega + \dot{\theta}) \sin \theta}$$

- для задньої осі:

$$\frac{(\overline{V_{c1}})_{y_0}}{(\overline{V_{c1}})_{x_0}} = \operatorname{tg} \delta_2',$$

$$\delta_2 = -\operatorname{arctg} \frac{(u - \omega b) - \omega d}{V}$$

- для кістяка автобуса з тяговою (ведучою) віссю:

$$\operatorname{tg} \delta_3 = \frac{(\overline{v_B})_y}{(\overline{v_B})_x} = \frac{-u + b\omega}{v - \varepsilon\omega} \quad (7)$$

Після визначення швидкостей окремих ланок автомобіля та кутів відведення коліс їхніх осей диференціальні рівняння руху автобуса записані у вигляді [7]:

$$(m_1 + m + m_2)\dot{V} + (m_1 c \sin \theta - m_2 d \sin \theta)\dot{\omega} + m_1 c \sin \theta \cdot \ddot{\theta} + m_2 d \sin \theta \ddot{\varphi} - \omega u (m_1 + m + m_2) + m_1 c (\omega + \dot{\theta})^2 \cos \theta + m_2 (\omega - \dot{\varphi})^2 d \cos \theta + \omega^2 (m_2 d - m_1 a) = X_1 \cos \theta - Y_1 \sin \theta + (X_2' - X_2'') + X_3;$$

$$(m_1 + m + m_2)\dot{u} + [m_1(a - c \cos \theta) - m_2(b + d \cos \theta)]\dot{\omega} - m_1 c \cos \theta \cdot \ddot{\theta} + m_2 d \cos \theta \ddot{\varphi} + \omega V (m_1 + m + m_2) + m_1 c (\omega + \dot{\theta})^2 \sin \theta - m_2 (\omega - \dot{\varphi})^2 d \sin \theta = X_1 \sin \theta + Y_1 \cos \theta + Y_2 + Y_3;$$

$$[I + m_1 a(a - c \cos \theta) + m_2 b(b + d \cos \theta)]\dot{\omega} - m_1 a c \cos \theta \ddot{\theta} + (m_1 a - m_2 b)\dot{u} + m_1 a c \cos \theta \ddot{\theta} + (m_1 a - m_2 d)\dot{\omega} + m_1 a c (\omega + \dot{\theta})^2 \sin \theta = a(X_1 \sin \theta + Y_1 \cos \theta) - b Y_2 + M_{p1} + (M_k' - M_k'');$$

$$(I_1 + m_1 c^2)\ddot{\theta} - [I_1 + m_1 c(a - c \cos \theta)]\dot{\omega} + m_1 c \sin \theta \cdot \dot{V} - m_1 c \cos \theta \cdot \dot{u} - m_1 c \omega (u + \omega a) \sin \theta - m_1 c \omega V \cos \theta = -c Y_1 - M_{cr1} - M_{p1}.$$

(8)

У системі рівнянь (8) прийняті такі позначення:

m, J – маса і момент інерції остова автобуса щодо вертикальної осі, що проходить через центр мас;

m_1, J_1 – маса і момент інерції

керівного колісного модуля щодо вертикальної осі, що проходить через центр мас автобуса;

x, y – координати центру мас автобуса;

$a; b$ – відстань від центру мас автобуса до точок кріплення передньої і задньої осі автобуса;

c – винос керованого колеса автобуса;

θ – кут повороту керованих коліс автобуса;

V, u, ω – поздовжня, бічна і кутова швидкість автобуса;

$X_1, X_2', X_2'', X_3, Y_1, Y_2, Y_3$ – поздовжні та бокові сили на першій, другій, третій осях;

$M/k, M'/k$ – моменти на внутрішньому і зовнішньому колесі тягової (ведучої) осі автобуса.

Мета введення комбінованого способу управління автобусом – зменшити габаритну смугу руху, що забезпечує необхідну маневреність, тобто вписуваність автобуса в регламентовану смугу руху.

У роботах [7] отримані рівняння динаміки кругового руху машини за комбінованого способу управління поворотом.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\operatorname{tg} \bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} \operatorname{tg}^2 \bar{\alpha}} \times \left[\frac{1}{m \cdot L} \left(\frac{M_{k1}}{r_{d1}} + \frac{M_{k2}}{r_{d2}} \right) - \frac{f g}{L} - \frac{f h}{L^3} \times \left(V_{x1}^2 + b \frac{dV_{x1}}{dt} \right) \operatorname{tg}^2 \bar{\alpha} + \frac{B}{2L^2 m} \operatorname{tg} \bar{\alpha} \times \left(\frac{M''_{k1} - M'_{k1}}{r_{d1}} - \frac{M''_{k2} - M'_{k2}}{r_{d2}} \right) \right] \quad (9)$$

де ω – кутова швидкість автомобіля в площині дороги;

t – час;

$\bar{\alpha}$ – середній кут повороту керованих коліс,

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{2} (\alpha' + \alpha'') \quad (10)$$

α' ; α'' – кути повороту внутрішнього (відносно до центру повороту) і зовнішнього напрямних коліс;

b – відстань від задньої осі до проекції центру мас автомобіля на горизонтальну площину;

m – маса автомобіля;

L – поздовжня колісна база автомобіля;

M_{k1} – сумарні крутні моменти на колесах тягової (ведучої) осі автобуса;

M_{k2} – сумарні гальмівні моменти на колесах третьої осі автобуса;

r_{d1} – динамічні радіуси тягових (ведучих) коліс автобуса;

f – коефіцієнт опору кочення коліс автобуса;

h – висота центра мас автобуса;

i_z – радіус інерції автобуса відносно вертикальної осі;

V_{x1} – лінійна швидкість метробуса в напрямку поздовжньої осі;

M'_{k1} ; M''_{k1} – крутні моменти на внутрішньому та зовнішньому тягових (ведучих) колесах автобуса,

$$M'_{k1} = M''_{k1};$$

M'_{k2} ; M''_{k2} – гальмівні моменти на внутрішньому та зовнішньому тягових (ведучих) колесах причепа.

Із рівняння (9) видно, що різниця крутних моментів на тягових (ведучих) колесах:

$$\Delta M_{k1} = M''_{k1} - M'_{k1} \quad (11)$$

та гальмівних моментів на колесах третьої осі:

$$\Delta M_{k2} = M''_{k2} - M'_{k2} \quad (12)$$

збільшують кутове прискорення $d\omega/dt$ метробуса у площині дороги. Якщо змінити знак вказаних різниць на протилежний у рівнянні (1.26), можна досягнути ситуації, у якій $d\omega/dt = 0$.

Подамо рівняння (9) у вигляді:

$$\frac{d\omega}{dt} = a(\alpha)[b(M) - c - d(v, \alpha) + k(\alpha, M)] \quad (13)$$

$$\text{де } a(\alpha) = \frac{tg \bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} tg^2 \bar{\alpha}},$$

$$b(M) = \left[\frac{1}{m \cdot L} \left(\frac{M_{k1}}{r_{d1}} + \frac{M_{k2}}{r_{d2}} \right) \right], \quad c = \frac{fg}{L},$$

$$d(v, \alpha) = \left[\frac{fh}{L^3} \times \left(V_{x1}^2 + b \frac{dV_{x1}}{dt} \right) tg^2 \bar{\alpha} \right],$$

$$k(\alpha, M) = \left[\frac{B}{2L^2 m} tg \bar{\alpha} \times \left(\frac{M''_{k1} - M'_{k1}}{r_{d1}} - \frac{M''_{k2} - M'_{k2}}{r_{d2}} \right) \right] \quad (14)$$

У визначенні складників рівняння (13) враховано, що між кутом повороту керованих коліс автобуса і його швидкістю існує залежність [8]:

$$v_{kpy} = \sqrt{\left(\left(\frac{\sqrt{\varphi^2 - f^2}}{tg \alpha} - f \right) g L \cos \alpha \right)}, \quad (15)$$

де v_{kpy} – критична швидкість щодо керованості;

φ – коефіцієнт зчеплення коліс із дорогою;

f – коефіцієнт опору кочення коліс;

g – прискорення вільного падіння;

L – база автобуса.

Визначимо критичну швидкість автобуса за комбінованого способу управління з таких вихідних даних: $a=4,5$ м; $b=2,3$ м; $m=23660$ кг; $L=6,8$ м; $r_{d1}=0,565$ м; $f=0,02$; $h=1,45$ м; – висота центра мас автобуса; $i_z^2=10,35$ м².

На **рис. 2** наведена залежність критичної швидкості щодо керованості для автобуса у функції кута повороту його керованих коліс.



Рис. 2. Залежність критичної швидкості щодо керованості від кута повороту керованих коліс автобуса

Оскільки між швидкістю щодо керованості та кутом повороту керованих коліс існує певна залежність, надалі у всіх розрахунках використані відповідні значення швидкості v_k і кута повороту керованих коліс α автобуса.

Показники маневреності автотранспортних засобів, як було зазначено раніше, визначають за колового руху. Кутове й окружне прискорення дорівнюють нулю, тобто $\frac{d\omega}{dt} = 0$ і $\frac{dV_{x1}}{dt} = 0$. Оскільки коефіцієнт $a(\alpha) \neq 0$, то

$$b(M) - c - d(v, \alpha) + k(\alpha, M) = 0 \quad (16)$$

Розв'яжемо рівняння (16) відносно α . Врахуємо, що за умов усталеного руху складники рівняння (16) $b(M)$ і c рівні між собою (за маневреності метробуса з незначною швидкістю силою опору повітря можна знехтувати), тобто:

$$b(M) = \left[\frac{I}{m \cdot L} \left(\frac{M_{k1}}{r_{d1}} + \frac{M_{k2}}{r_{d2}} \right) \right] = \frac{fg}{L}. \quad (17)$$

За цієї умови:

$$d(v, \alpha) = k(\alpha, M). \quad (18)$$

Подальші розрахунки проведемо для трьох умов руху автобуса. За першої умови задаємо швидкість руху сталою, рівною 5 м/с і визначаємо радіус повороту автобуса за кінематичного способу повороту, необхідну різницю крутних моментів на колесах причепа, за другої умови – за комбінованого способу повороту, тобто повороту керованих коліс і різниці крутних моментів на колесах тягової (ведучої) осі і за третьої умови – повороту керованих коліс і різниці крутних моментів на колесах тягової (ведучої) осі та гальмівних моментів на колесах третьої осі.

На **рис. 3** представлена залежність різниці крутних моментів на колесах тягової (ведучої) осі автобуса, гальмівних моментів на колесах третьої осі та сумарних моментів на другій (ведучій) і третій осях автобуса, що еквівалентно куту повороту керованих коліс автобуса (відповідає куту повороту його керованих коліс під час руху кривою заданого радіуса).

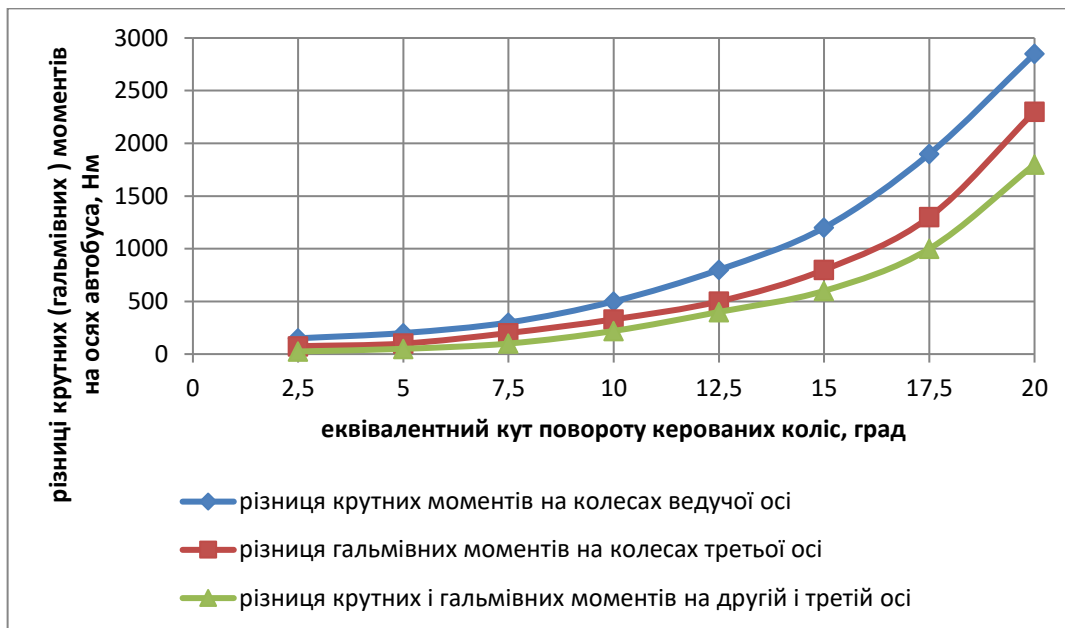


Рис. 3. Залежність різниці моментів на колесах осей автобуса, що еквівалентно куту його керованих коліс

Як випливає з **рис. 3**, при фіксованій швидкості повороту, $v=5$ /с, різниця крутних моментів на внутрішньому і зовнішньому колесі ведучої осі, гальмівних моментів на колесах третьої осі і крутних і гальмівних моментів, що діють одночасно, при русі по кривим малого радіусу прогресивно збільшуються. Пояснюється це нелінійною зміною величини $\text{tg}\alpha$ для забезпечення необхідного радіусу повороту автобуса.

За визначенням еквівалентним кутом повороту коліс другої і третьої осі автобуса визначалася габаритна смуга руху (ГСР). При цьому

незмінним приймався внутрішній габаритний радіус повороту ($R_{\text{вг}}=5,3$ м) і швидкість руху автобуса (5 м/с).

На **рис. 4** наведені ГСР автобуса за різних способів повороту – кінематичного (поворот керованих коліс автобуса – управління 1) і комбінованого з урахуванням різниці крутних моментів на ведучій осі (управління 3), гальмівних моментів на третій осі (управління 2) і одночасній дії крутних і гальмівних моментів на другій і третій осях (управління 4). При цьому максимальний кут повороту керованих коліс автобуса приймався 35° .

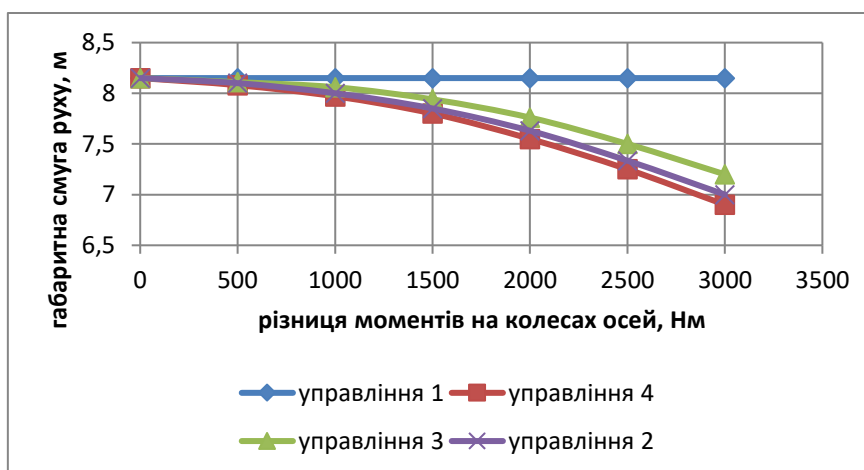


Рис. 4. Залежність габаритної смуги руху автобуса від системи управління

Як бачимо з **рис. 4**, автобус за системи управління 1 не відповідає вимогам Правил №36.03 ЄЕК ООН щодо маневреності. За комбінованого способу управління автобусом за величини різниці моментів на колесах другої і третьої осі в межах $\Delta M=2550-3000$ Нм ці вимоги виконуються, причому найкращою за конструкцією є система управління 2 (гальмування коліс третьої осі). Проте такий спосіб повороту може бути запропонований тільки для поліпшення маневреності на незначних швидкостях руху (до 10 м/с). За умови збільшення швидкості руху понад 10 м/с систему управління колесами третьої осі слід блокувати.

Висновки

1. Показано, що керування автобусом надвеликої місткості може бути здійснене не лише кінематичним способом – поворотом керованих коліс автобуса, а й комбінованим способом – керуванням керованих коліс автобуса і тягових (ведучих) коліс автобуса шляхом створення різних за величиною крутних моментів на колесах цієї осі або створенням гальмівних моментів на третій осі, що може значно спростити систему його управління

2. Отримана залежність різниці крутних моментів на колесах тягової (ведучої) осі автобуса, гальмівних моментів на колесах третьої осі та сумарних моментів на другій (ведучій) і третій осях автобуса, що еквівалентна куту повороту керованих коліс автобуса.

3. Встановлено, що автобус за кінематичного способу управління (поворот керованих коліс автобуса – система управління 1) не відповідає вимогам Правил №36.03 ЄЕК ООН щодо маневреності. За комбінованого способу управління автобусом (системи управління 2-4) за величини різниці моментів на колесах другої і третьої осі в межах $\Delta M=2550-3000$ Нм ці вимоги виконуються, причому найкращою за конструкцією є система управління 2 (гальмування коліс третьої осі). Проте такий спосіб повороту може бути запропонований тільки для поліпшення маневреності на незначних

швидкостях руху (до 10 м/с). За умови збільшення швидкості руху понад 10 м/с систему управління колесами третьої осі слід блокувати.

4. Поліпшення маневреності т стійкості автобусів особливо великого класу досягається завдяки керуванню як передніми, так і задніми колесами. Перспективним для такого керування може бути гібридна силова установка, електрична частина якої як вмикається у процесі розганяння автобуса, так і у процесі його управління задньою віссю за динамічного способу її повороту. Визначення потужності гібридної силової установки та раціональний розподіл потужності між основним двигуном внутрішнього згоряння та електродвигуном є предметом подальших досліджень.

References

1. Wei, L., Hongwen, H., Fenchun, S., Jiangyi, L. (2017). Integrated chassis control for a three-axle electric bus with distributed driving motors and active rear steering system, *Vehicle System Dynamics*, 55(5), 2017, 601-625.
<https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1267368>
2. Fragassa, C. (2017). Electric city buses with modular platform: a design proposition for sustainable mobility, in: Campana, G., et al. (eds), *Sustainable Design and Manufacturing 2017 (SDM 2017)*, Smart Innovation, Systems and Technologies 68, Springer, Cham, Switzerland, 14.1, 789-800, 2017.
Retrieved from
https://journals.scu.ac.ir/article_16702.html?lang=en
3. Van de Molengraft-Luijten, M. F. J., Besselink, I. J. M., Verschuren, R. M. A. F., Nijmeijer, H. (2012). Analysis of the lateral dynamic behaviour of articulated commercial vehicles, *Vehicle System Dynamics*, 50(1), 2012, 169-189.
<https://doi.org/10.1080/00423114.2012.676650>
4. Aurell, J., Winkler, C. B. (1985). Standard Test Procedures for the Lateral Stability of Heavy Vehicle Combinations, *Road Transport Technology*, 4, 463-471.
5. Troger, H., Zeman, K. (1984). A non-linear analysis of the generic types of loss of stability of the steady-state motion of a tractor semi-trailer, *Vehicle System Dynamics*, 13, 161-172.
6. Sakhno, V. P., Polyakov, V. M., Sharay, S. M., Murovany, I. S., Omelnytskyi, O.E. (2021). *Articulated buses. Maneuverability and stability: a monograph*. Lutsk: IVV of Lutsk NTU, 288.
ISBN 978-617-672-243-4
7. Sakhno, V., Stelmashchuk, V., Onyshchuk, V., Popelysh, D., Tomchuk, S. (2019). On the question of the dynamic method of driving a car. *Modern technologies in mechanical engineering in transport*. Volume 2 No. 13, 156-162. ISSN 2313-5425
8. Sakhno, V.P. etc. (2015). Operational properties of motor vehicles. In 3 h. Ch 3. *Maneuverability. Controllability. Stability: [training manual]*. Donetsk: Knowledge publishing house (Donetsk branch), 444. ISBN 978-617-579-925-3 (Part 3)