

Сахно<sup>1</sup> В.П., Мурований<sup>2</sup> І.С., Стельмашук<sup>2</sup> В.В., Онищук<sup>2</sup> В.П., Омельницький<sup>1</sup> О.Є.

<sup>1</sup>Національний транспортний університет

<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет

## ШЛЯХИ ПОЛІПШЕННЯ МАНЕВРНОСТІ МЕТРОБУСА

Проведеними дослідженнями кінематики повороту триланкового метробуса встановлено, що поліпшити показники маневреності триланкового метробуса за рахунок компоновальних параметрів автобуса і причіпних ланок у граничних режимах руху практично неможливо. Наявність керованого причепа показує на досить складні залежності кутів складання від кута повороту керованих коліс автобуса, проте за обраного передаточного відношення приводу управління метробус не вписується у допустиму смугу руху, регламентовану DIRECTIVE 2002/7/EC. Це необхідно враховувати при проектуванні траси для руху триланкових метробусів.

**Ключові слова:** автопоїзд, причіп, зміщення, траєкторія, габаритна смуга руху, привод управління, передаточне відношення

**Постановка проблеми.** Метробус або нова система автобусного руху "Швидкісний автобусний транспорт" (Bus Rapid Transport, BRT) має свої, окремі від основного транспорту, смуги руху на вулицях міста [1]. Ця система має ряд незаперечних переваг:

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

У даний час, все більше міст вибирають систему швидкісного автобусного транспорту з таких важливих причин, як вартість і зручність. Вартість будівництва рейкового ширококолісного транспорту, як метро, у 10 разів вище, ніж BRT. Більше того, міста, які вибирають систему BRT, можуть почати її експлуатацію на протязі 2 років, а будівництво метро може затягнутися десятиліттями.

Сьогодні, метробуси працюють в багатьох країнах: США, Бразилія, Венесуела, Колумбія, Гватемала, Канада, Мексика, Австралія, Нова Зеландія, Японія, Іран, Туреччина, Франція, Чехія, Росія, Казахстан та ін. Цей список швидко оновлюється, так як все більше міст приймає рішення на користь системи BRT. Метробус пропонується і в Києві. У різних містах і країнах система може виглядати по-різному: десь будують спеціальні пункти зупинки з платформою, в інших використовують невеликі станції зупинки. Єдиного стандарту ніде немає, кожне місто вирішує свої проблеми за своїм, з огляду на географічне положення міста, рух пасажиропотоку, забудову міста. Але всі сходяться в одному - BRT відмінний спосіб помічник у вирішенні екологічної та транспортної задачі [1].

У роботі [2] розглянута кінематика повороту дво- і триланкових метробусів, визначені габаритні радіуси повороту і габаритна смуга руху, яка при фіксованому внутрішньому габаритному радіусі  $R_{вг}=5,3$  м склала для дволанкових 8,9 м, а триланкових – 9,9 м, що значно перевищує максимально допустиму за DIRECTIVE 2002/7/EC [3]. Тому метою роботи є поліпшення маневреності метробусів за рахунок керованих причіпних ланок.

**Результати досліджень.** У роботах [4-10] доведено, що маневреність транспортних засобів на попередньому етапі можна визначати на жорстких у бічному напрямку колесах. При цьому похибка розрахунків габаритної смуги руху (ГСР) не перевищить 10...12%.

Методика розрахунку ГСР базується на визначенні кутів складання ланок автопоїзда і зміщення траєкторій ведених ланок щодо траєкторії автомобіля-тягача. Ця методика може бути застосована і для визначення ГСР метробуса з керованими причіпними ланками.

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

У такому випадку триланковий метробус можна розділити на дві пари кінематичних ланок – автобус + перший причіп з некерованими колесами (осями) і перший причіп + другий причіп з керованою задньою віссю. Дволанковий метробус можна отримати із триланкового, якщо знехтувати першим причепом.

Згідно теореми 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. 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 перший причіп – т.  $O_1$ . Ведена ланка (причіп), здійснюючи абсолютний рух навколо центра  $O_1$ , одночасно переміщується відносно ведучої ланки (автобуса) з миттєвим центром швидкостей  $O'_0$  обертання в точці зчеплення, рис. 1.

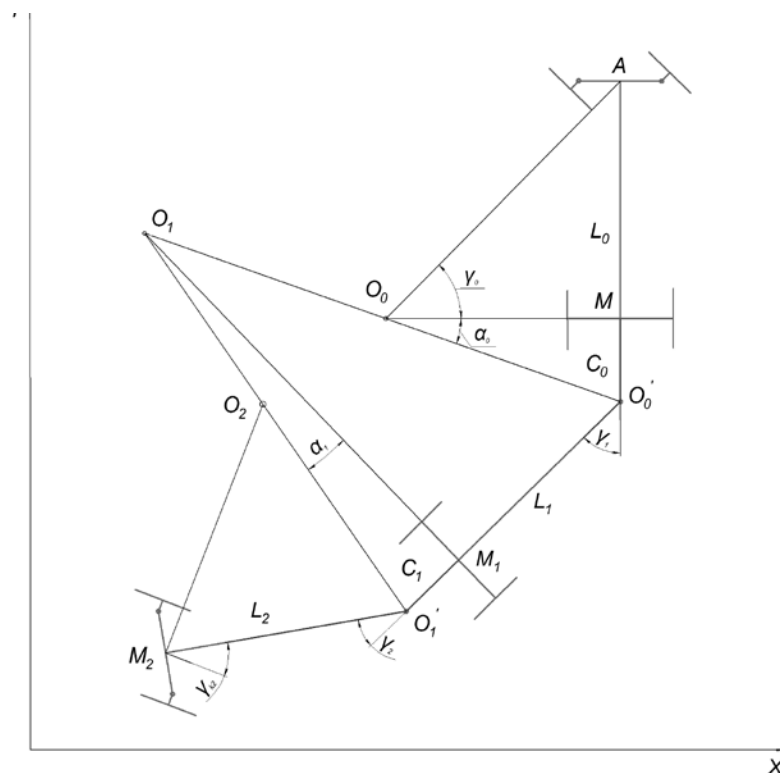


Рисунок 1 – Схема повороту триланкового метробуса з керованим другим причепом

При цьому між поздовжніми осями ланок виникає кут складання  $\gamma_1$ . Рух же автобуса є для причепа переносним з миттєвим центром швидкостей у точці  $O_0$ . Таким чином, ведена ланка – причіп здійснює складний рух: переносний з автобусом з кутовою швидкістю  $\omega_c$ , відносний – з кутовою швидкістю  $\omega$  і абсолютний – з кутовою швидкістю  $\omega_1$  і з відповідними центрами обертання  $O_0, O'_0, O_1$ .

При односторонньому криволінійному русі автопоїзд проходить декілька стадій [4]:

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

- стадія входження в поворот (рис. 2, а). Рух по головній вхідній траєкторії характеризується тим, що кут повороту керованих коліс автобуса збільшується від нуля до деякої заданої водієм величини; в частковому 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  $\gamma_{0MAX}$

(точка С), а для причепа – деякому значенню кута складання  $\gamma_1$  ланок. Відстань  $\overline{O_0O'_0} \neq 0$ , а відносна кутова швидкість обертання причепа  $d\gamma_1/dt < 0$ .

- стадія кругового повороту. Рух автобуса відбувається по коловій траєкторії з постійним радіусом, коли центр  $O_0$  співпадає з точкою С (рис. 2, б). Кут повороту керованих коліс автобуса 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  $R_{\text{OMIN}}$ . Абсолютний миттєвий центр обертання причепа може розташовуватися наступним чином. При першому варіанті, тобто при неграничному повороті, центр  $O_1$  не досягає точки С до кінця стадії кругового повороту і відстань  $O_0O_1$  на цій стадії залишається більшою нуля. Відносна кутова швидкість причепа  $d\gamma_1/dt < 0$ . Іншими словами, круговий поворот автобуса закінчується до того, як співпадут 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 співпадут з абсолютним центром обертання автобуса (рис. 2, в) у точці С. Відносна кутова швидкість  $d\gamma_1/dt = \omega_0 = \omega_1$ , тобто метробус обертається як єдине ціле навколо центра С;

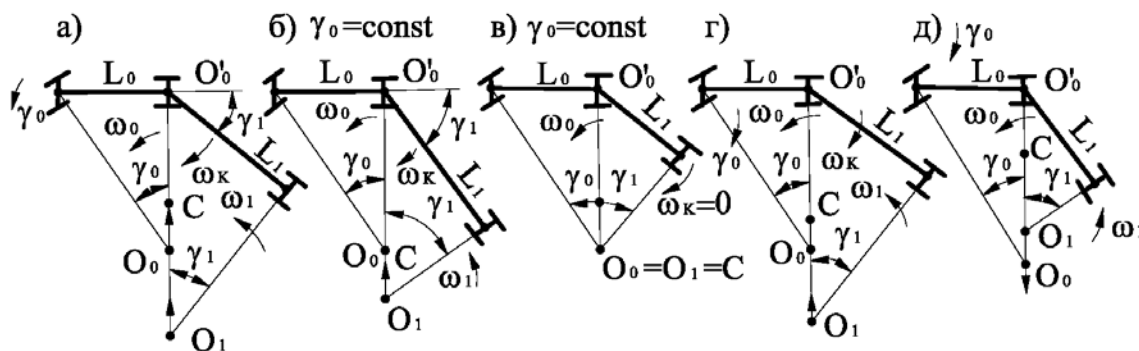


Рисунок 2 – Положення першої пари кінематичних ланок метробуса [4]

- стадія виходу з повороту. Рух автобуса відбувається по головній вихідній траєкторії при поступовому зменшенні кута  $\gamma_0$  від  $\gamma_{0\text{MAX}}$  для даного повороту до нуля при виході на пряму. Так же, як і при вході в поворот, керовані колеса можуть бути повернуті на місці, тобто при режимному параметрі  $K_{\text{П}} \rightarrow \infty$ . При виході з повороту абсолютні миттєві центри обертання автобуса і причепа поступово пореміщуються у нескінченність, залишаючись на одній лінії  $\overline{O_1O'_0}$ , а відстань  $\overline{O_1O'_0}$  все інтенсивніше збільшується. При найбільш реальному неграничному повороті в початковий період зменшення кута  $\gamma_0$  від  $\gamma_{0\text{MAX}}$  до деякого проміжного значення  $0 < \gamma_0 < \gamma_{0\text{MAX}}$  кут складання  $\gamma_1$  продовжує збільшуватися. Це пояснюється тим, що абсолютний центр обертання  $O_0$  автобуса прямує в нескінченність, а абсолютний центр обертання  $O_1$  причепа рухається йому назустріч (рис. 2, з) і, значить, відповідно до теореми про складання обертань плоскої фігури, напрями переносного і відносного рухів повинні бути зворотними і по схемі (рис. 2, з) кутова швидкість  $\omega_k$  повинна бути направлена за годинниковою стрілкою. Збільшення кута складання буде відбуватися, доки обидва абсолютні центри обертання  $O_0$  і  $O_1$  не зустрінуться в одній точці. Цим закінчується перша фаза. З цього моменту кут  $\gamma_1$  починає зменшуватися і починається друга фаза неграничного повороту. Граничний поворот маловірогідний і вихід з нього практично співпадає за своїми характеристиками з другою фазою виходу з неграничного повороту (рис. 2, д). Одразу ж зі зменшенням кута  $\gamma_0$  кут складання  $\gamma_1$  ланок починає також зменшуватися, відстань  $\overline{O_0O_1}$  стає менше нуля і збільшується, прямуючи до нескінченності;

- вихід автомобіля-тягача 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 метробуса, а саме автобус і перший причіп справедливі і для другої пари – перший причіп з некерованими колесами (осями) і другий причіп з керованими колесами задньої осі (поворотною задньою віссю).

Аналіз залежностей криволінійного руху метробуса дає чітку картину процесу повороту. Для визначення положення його причіпних ланок на повороті необхідно знайти величини кутів складання, які визначають положення ведених причіпних ланок автопоїзда на повороті.

Розглянемо рух першої пари ланок метробуса (рис. 3), що складається з двовісного автобуса (тривісний автобус може бути приведений до двовісного) і одновісного причепа (двовісний причіп з центрально розташованими осями може бути приведений до одновісного), що має неповоротну ходову вісь і винос  $c_0$  точки зчеплення автобуса з причепом  $O'_0$ , через що виникає кут  $\alpha_0$ . Поздовжні осі автобуса і причепа повернуті по відношенню до вихідного прямолінійного положення вздовж осі  $x$  відповідно на кути  $\psi_0$  і  $\psi_1$ .

З рис. 3 слідує, що  $\gamma_1 = \psi_0 - \psi_1$ . Диференціювання цього рівняння для першої причіпної ланки – причепа дає рівняння [4]:

$$\frac{d\gamma_1}{dt} = \frac{d\psi_0}{dt} - \frac{d\psi_1}{dt} = \omega_0 - \omega_1. \quad (1)$$

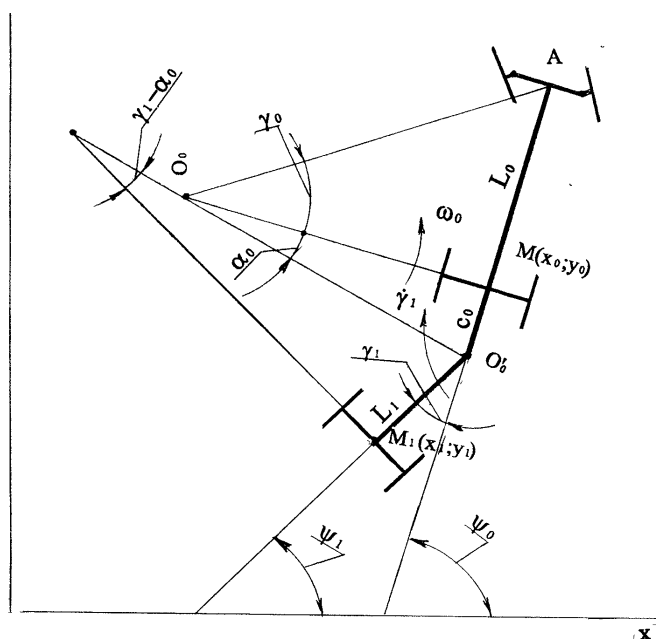


Рисунок 3 – Схема криволінійного руху автобуса і першого причепа

Рівняння (1) для другого причепа:

$$\frac{d\gamma_2}{dt} = \omega_1 - \omega_2, \quad (2)$$

де  $\gamma_2$  – кут складання між першим і другим причепом;

$\omega_1$  і  $\omega_2$  – абсолютні кутові швидкості повороту першого і другого причепа.

Рух триланкового метробуса опишеться системою диференціальних рівнянь [4]:

$$\frac{d\gamma_1}{dt} = \omega_0 - \omega_1, \quad (3)$$

$$\frac{d\gamma_2}{dt} = \omega_1 - \omega_2$$

Записана система рівнянь (3) дає можливість отримати значення кутів складання в залежності від конструктивно-геометричних факторів і режиму руху метробуса. Для цього необхідно розгорнути рівняння (3) і визначити співвідношення  $\overline{O_0O'_0}/\overline{O_1O'_0}$ , а також  $\overline{O_1O'_1}/\overline{O_2O'_1}$ .

Згідно до схеми криволінійного руху автопоїзда (рис. 3) маємо:

$$\overline{O_0O'_0} = \frac{O_0M}{\cos(\alpha_0)}. \quad (4)$$

Але з трикутника  $O_0MA$  можна отримати вираз:

$$\frac{L_0}{O_0M} = \operatorname{tg}(\gamma_0) \Rightarrow O_0M = \frac{L_0}{\operatorname{tg}(\gamma_0)}, \quad (5)$$

$$\overline{O_0O'_0} = \frac{L_0}{\operatorname{tg}(\gamma_0) \cdot \cos(\alpha_0)}. \quad (6)$$

Тоді з трикутника  $O_1O'_0M_1$  отримуємо:

$$\overline{O_1O'_1} = \frac{L_1}{\sin(\gamma_1 - \alpha_0)}, \quad (7)$$

$$\frac{\overline{O_1M_1}}{\sin(\pi/2 - \gamma_1 + \alpha_0)} = \frac{L_1}{\sin(\gamma_1 - \alpha_0)}, \quad \overline{O_1M_1} = \frac{L_1 \cdot \cos(\gamma_1 - \alpha_0)}{\sin(\gamma_1 - \alpha_0)}. \quad (8)$$

Згідно отриманих рівнянь невідомими залишаються ще значення двох векторів, зокрема  $O_1O'_1$  та  $O_2O'_1$ . Значення одного з них знайдемо з трикутника  $O_1O'_1M_1$ :

$$\overline{O_1O'_1} = \frac{\overline{O_1M_1}}{\cos \alpha_1}, \quad (9)$$

Після підстановки виразу (8) у (9) отримаємо:

$$\overline{O_1O'_1} = \frac{L_1 \cdot \cos(\gamma_1 - \alpha_0)}{\sin(\gamma_1 - \alpha_0)}. \quad (10)$$

Після визначення вектора  $\overline{O_1O'_1}$  знайдемо вектор  $\overline{O_2O'_1}$ . З трикутника  $O_2M_2O'_1$  отримаємо:

$$\overline{O_2O'_1} = \frac{L_2}{\sin \gamma_2}. \quad (11)$$

Тепер, взявши до уваги (6), можливо переписати рівняння для першого кута складання у розгорнутому вигляді:

$$\frac{d\gamma_1}{dt} = \omega_0 \left( 1 - \frac{L_0}{\operatorname{tg}(\gamma_0) \cdot \cos(\alpha_0)} \cdot \frac{\sin(\gamma_1 - \alpha_0)}{L_1} \right), \quad (12)$$

Як відмічалось раніше, другий причіп метробуса виконаний керованим. Найбільш вживаним на-сьогодні є прямиий привід управління колесами (осями) причіпних ланок. При цьому кут повороту повороту керованих коліс (осей) ланок запишеться через відповідне передаточне відношення [4]:

$$\gamma_{k2} = \frac{\gamma_2}{i_1} - \gamma_2 \quad (13)$$

Прийнявши до уваги два вищезазначені вирази отримуємо:

$$\frac{d\gamma_1}{dt} = \omega_0 \left( 1 - \frac{L_0}{\operatorname{tg}(\gamma_0) \cdot \cos(\alpha_0)} \cdot \frac{\sin(\gamma_1 - \alpha_0)}{L_1} \right), \quad (14)$$

$$\frac{d\gamma_2}{d\gamma_0} = \frac{\sin\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \alpha_0\right)}{K_{II} \cdot L_1 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1\right) \cdot \cos(\alpha_0)} \cdot \left( 1 - \frac{\cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1\right)}{\cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1 + \alpha_1\right)} \cdot \frac{L_1 \cdot \cos(\gamma_1 - \alpha_0)}{\sin\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \alpha_0\right)} \cdot \frac{\sin\left(-\frac{\gamma_1}{i_0} + \gamma_1 + \frac{\gamma_2}{i_1} - \alpha_1\right)}{L_2 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_2}{i_1} - \gamma_2\right)} \right) \quad (15)$$

Під час виконання повороту величина кута  $\alpha_0$  повністю залежить від відповідного кута повороту керованих коліс автомобіля-тягача  $\gamma_0$ . Тому переписемо рівняння (14) і (15), виключивши з них величину  $\alpha_0$ . Так за відомими тригонометричними формулами маємо:

$$\sin(\gamma_1 - \alpha_0) = \sin \gamma_1 \cdot \cos(\alpha_0) - \sin(\alpha_0) \cdot \cos \gamma_1 = \cos(\alpha_0) \cdot [\sin \gamma_1 - \operatorname{tg}(\alpha_0) \cdot \cos \gamma_1] \quad (16)$$

Тоді за допомогою нескладних перетворень отримаємо:

$$\operatorname{tg}(\alpha_0) = \frac{C_0}{O_0M} = \frac{C_0 \cdot \operatorname{tg}(\gamma_0)}{L_0}. \quad (17)$$

Використовуючи відому тригонометричну залежність отримаємо:

$$1 + \operatorname{tg}^2(\alpha_0) = \frac{1}{\cos^2(\alpha_0)} \Rightarrow \cos(\alpha_0) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{C_0 \cdot \operatorname{tg}(\gamma_0)}{L_0}\right)^2}}. \quad (18)$$

Оскільки значення кута  $\alpha_0$  не може перевищити  $90^\circ$ , то значення косинуса завжди залишатиметься додатнім. Поряд з цим маємо ще ряд виразів:

$$\begin{aligned} \cos(\gamma_1 - \alpha_0) &= \cos(\gamma_1) \cdot \cos(\alpha_0) + \sin(\gamma_1) \cdot \sin(\alpha_0) = \\ &= \cos(\alpha_0) \cdot [\cos(\gamma_1) + \operatorname{tg}(\alpha_0) \cdot \sin(\gamma_1)]. \end{aligned} \quad (19)$$

Замінивши у рівняннях (15) і (16) відповідні вирази на (17)...(19), отримаємо:

$$\frac{d\gamma_1}{d\gamma_0} = \frac{\operatorname{tg}(\gamma_0)}{K_{II} \cdot L_0} \cdot \left( 1 - \frac{L_0}{\operatorname{tg}(\gamma_0)} \cdot \frac{\left( \sin \gamma_1 - \frac{C_0 \cdot \operatorname{tg}(\gamma_0)}{L_0} \cdot \cos \gamma_1 \right)}{L_1} \right), \quad (20)$$

$$\frac{d\gamma_2}{d\gamma_0} = \frac{\left( \sin \gamma_1 - \frac{C_0 \cdot \operatorname{tg}(\gamma_0)}{L_0} \cdot \cos \gamma_1 \right)}{K_{II} \cdot L_1} - \frac{\left( \cos(\gamma_1) + \frac{C_0 \cdot \operatorname{tg}(\gamma_0)}{L_0} \cdot \sin(\gamma_1) \right)}{K_{II} \cdot \cos\left(\frac{\gamma_2}{i_1} - \gamma_2\right)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\gamma_2}{i_1} - \gamma_2\right)}{L_2} \quad (21)$$

З формул (20) і (21) видно, що отримані рівняння не складають систему, бо перше рівняння зовсім не залежить від другого. Тобто, коли в автопоїзді немає зворотніх зв'язків, то рух наступних ланок не впливає на рух попередніх ланок. Така схема дуже ідеалізована, але враховуючи, що триланковий метробус не може виконувати поворот з високою швидкістю, на практиці розходження між розрахунковими і дійсними значеннями лежать у допустимих межах.

Оскільки в загальному випадку під час виконання повороту метробус проходить чотири стадії (входження в поворот, рух по колу, вихід з повороту, прямолінійний рух до повернення всіх параметрів у початковий стан), то рівняння (20) і (21) можна застосувати лише для першої стадії виконання повороту.

Під час руху по коловій траєкторії з радіусом  $R_{0MIN}$  (якщо є така ділянка) визначальним параметром стає центральний кут  $\varphi_K$ . Приймавши до уваги співвідношення  $d\gamma_0 = R_{0MIN} \cdot K_{II} \cdot d\varphi_K$ , а також умову, що  $\gamma_0 = \operatorname{const} = \gamma_{0MAX}$  отримаємо:

$$\frac{d\gamma_1}{d\varphi_K} = \left( 1 - R_{0MIN} \cdot \frac{\left( \sin \gamma_1 - \frac{C_0}{R_{0MIN}} \cdot \cos \gamma_1 \right)}{L_1} \right), \quad (22)$$

$$\frac{d\gamma_2}{d\varphi_K} = \frac{\left( \sin \gamma_1 - \frac{C_0}{R_{0MIN}} \cdot \cos \gamma_1 \right) \cdot R_{0MIN}}{L_1} - \frac{\left( \cos(\gamma_1) + \frac{C_0}{R_{0MIN}} \cdot \sin(\gamma_1) \right) \cdot R_{0MIN}}{L_2 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_2}{i_1} - \gamma_2\right)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\gamma_2}{i_1} - \alpha_1\right)}{\cos \alpha_1} \quad (23)$$

При виході з повороту застосовують рівняння (20) і (21), але оскільки рульове колесо обертається у зворотньому напрямку, то коефіцієнт  $K_{II}$  має від'ємне значення.

Остання стадія – прямолінійний рух автобуса до того часу, поки всі вихідні параметри не повернуться у вихідний стан. Так на цій стадії кути складання ланок метробуса вже не залежать від положення керованих коліс, а лише від шляху, який проходить автобус. При цьому  $\gamma_0 = 0$ . Отже отримаємо:

$$\frac{d\gamma_1}{dS_0} = -\frac{\sin \gamma_1}{L_1}, \quad (24)$$

$$\frac{d\gamma_2}{dS_0} = \frac{\sin \gamma_1}{L_1} - \frac{\cos(\gamma_1)}{\cos\left(\frac{\gamma_2}{i_1} - \gamma_2\right)} \cdot \frac{\sin\left(\gamma_1 + \frac{\gamma_2}{i_1}\right)}{L_2 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_2}{i_1} - \gamma_2\right)}. \quad (25)$$

Отримана система рівнянь описує залежності кутів складання триланкового метробуса для різних стадій його повороту. Для її практичного застосування необхідно виконати ще ряд перетворень.

Отже, якщо прийняти, що точка  $O'_0$  рухається зі сталою швидкістю  $V_0$ , то, відповідно, усі точки метробуса обертатимуться навколо миттєвого центра швидкостей  $O_0$  з кутовою швидкістю  $\omega_0$ , яка в свою чергу може бути знайдена:



$$\omega_0 = \frac{V_0}{O_0 M} = \frac{V_0 \cdot \operatorname{tg}(\gamma_0)}{L_0}. \quad (26)$$

Тоді перший причіп обертатиметься навколо миттєвого центра швидкостей  $O_1$  з кутовою швидкістю  $\omega_1$ :

$$\omega_1 = \frac{\overline{\omega_0 \cdot O_0' O_0}}{O_1 O_0'} = \frac{V_0 \cdot \sin(\gamma_1 - \alpha_0)}{L_1 \cdot \cos(\alpha_0)}. \quad (27)$$

Тепер систему диференціальних рівнянь можна представити у вигляді:

$$\frac{d\gamma_1}{dt} = \frac{V_0 \cdot \operatorname{tg}(\gamma_0)}{L_0} \cdot \left( 1 - \frac{L_0}{\operatorname{tg}(\gamma_0) \cdot \cos(\alpha_0)} \cdot \frac{\sin(\gamma_1 - \alpha_0)}{L_1} \right), \quad (28)$$

$$\frac{d\gamma_2}{dt} = \frac{V_0 \cdot \sin(\gamma_1 - \alpha_0)}{L_1 \cdot \cos(\alpha_0)} \cdot \left( 1 - \frac{L_1 \cdot \cos(\gamma_1 - \alpha_0)}{\sin(\gamma_1 - \alpha_0)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\gamma_2}{i_1} - \gamma_2\right)}{L_2} \right) \quad (29)$$

Але у лівій частині рівнянь присутній вираз  $dt$ , що є не зручним для використання, тому перепишемо їх інакше.

Відомо, що  $\gamma_0 = K_{\Pi} \cdot V_0 \cdot t$ . Тоді, якщо швидкість залишається незмінною,  $d\gamma_0 = K_{\Pi} \cdot V_0 \cdot dt$ . Звідси маємо:

$$\frac{d\gamma_1}{d\gamma_0} = \frac{\operatorname{tg}(\gamma_0)}{K_{\Pi} \cdot L_0} \cdot \left( 1 - \frac{L_0}{\operatorname{tg}(\gamma_0) \cdot \cos(\alpha_0)} \cdot \frac{\sin(\gamma_1 - \alpha_0)}{L_1} \right), \quad (30)$$

$$\frac{d\gamma_2}{d\gamma_0} = \frac{\sin(\gamma_1 - \alpha_0)}{K_{\Pi} \cdot L_1 \cdot \cos(\alpha_0)} \cdot \left( 1 - \frac{L_1 \cdot \cos(\gamma_1 - \alpha_0)}{\sin(\gamma_1 - \alpha_0)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\gamma_2}{i_1} - \gamma_2\right)}{L_2} \right) \quad (31)$$

Отримані диференціальні рівняння у загальному вигляді не інтегруються. Тому для їх вирішення було застосовано прикладне програмне забезпечення Mathcad.

На рис. 2.19 – 2.20 наведені результати розрахунку кутів складання триланкового метробуса із задньою керованою віссю другого причепа за прямого приводу на цю вісь і передаточного відношення приводу управління 0,5. За знайденими кутами складання були визначені зміщення траєкторій ланок триланкового метробуса і габаритна смуга руху необхідна для повороту метробуса на  $90^0$ ,  $180^0$  і за колового руху, табл. 1. У цій же табл.1 наведені значення зміщення траєкторії ланок метробуса і його ГСР за некерованих причепів.

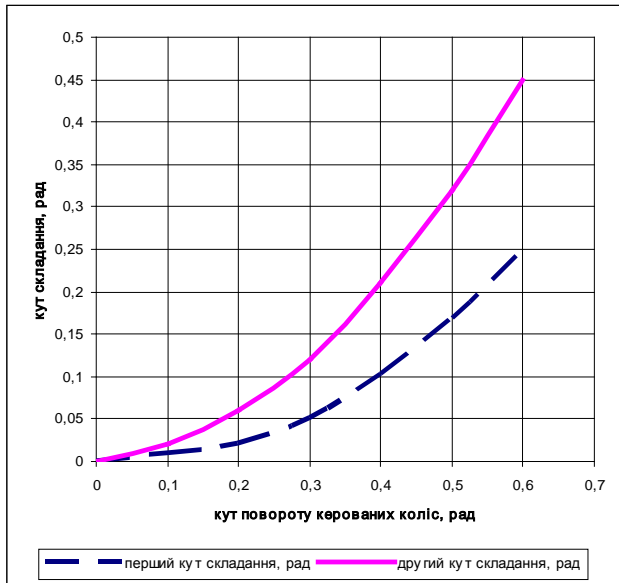
**Висновки.** Проведеними дослідженнями кінематики повороту триланкового метробуса встановлено:

- при неграничному повороті поворот усіх елементарних кінематичних ланок здійснюється на першій стадії послідовно, причому друга ланка забігає більш інтенсивно у внутрішню сторону повороту, збільшуючи другий кут складання у порівнянні з першим. Аналогічні змінюються і швидкості обертання ланок метробуса незалежно від режиму його повороту. Співвідношення кутів  $\gamma_0$  і  $\gamma_1$  в кінці першої стадії повороту складає біля 0,5, у той час як співвідношення кутів  $\gamma_2$  і  $\gamma_1$  становить більше одиниці;

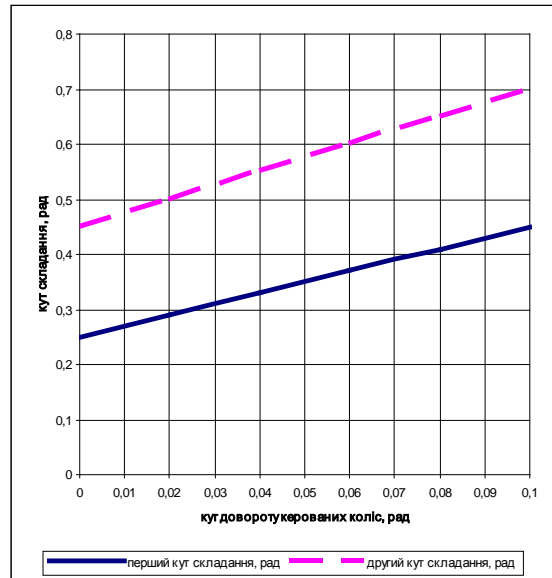
- поліпшити показники маневреності триланкового метробуса за рахунок компоновальних параметрів автобуса і причіпних ланок у граничних режимах руху практично неможливо;

- кути складання суттєво залежать від режиму криволінійного руху автопоїзда. Зі зменшенням режимного коефіцієнта повороту зменшуються і кути складання ланок автопоїзда  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  при одному і тому ж значенні приведенного кута повороту  $\gamma_0$  керованих коліс автобуса, так як метробус займає при цьому менш “складене” положення;

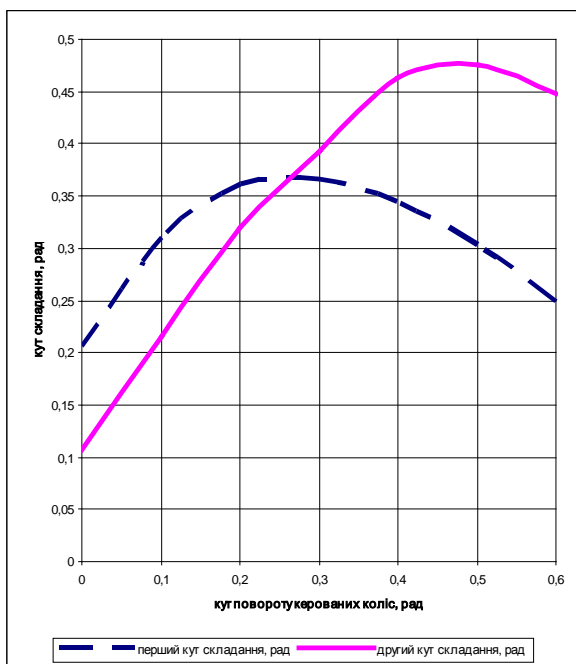




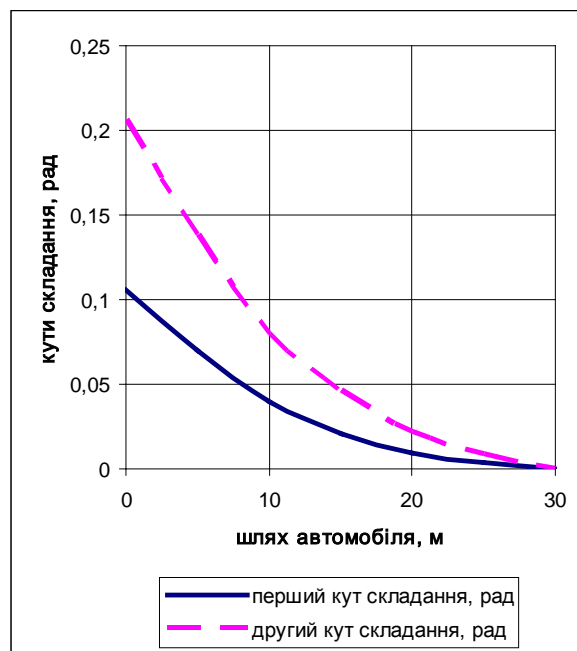
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Залежність кутів складання ланок метробуса від кута повороту керованих коліс автобуса: а) вхід в поворот; б) коловий рух; в) вихід із повороту; г) прямолінійний рух автобуса

Таблиця 1 - Габаритна смуга руху триланкового метробуса

Габаритна смуга руху триланкового метробуса, м					
Поворот 90 <sup>0</sup>		Поворот 180 <sup>0</sup>		Коловий рух	
некерований	керований	некерований	керований	некерований	керований
6,8	6,1	8,2	7,5	9,9	8,1

- кут складання  $\gamma_2$  в початковий період повороту автопоїзда може приймати від'ємні значення. Це явище спостерігається тільки при повороті з відносно великими значеннями режимного коефіцієнта повороту  $K_{\Pi}$  і пояснюється тим, що при різкому повороті автобуса точки зчеплення виходять за лінію початкового прямолінійного руху метробуса;
- при односторонньому повороті траєкторії причіпних ланок зміщуються по відношенню до траєкторії автобуса до центра повороту, збільшуючи при цьому габаритну смугу руху, причому зміщення траєкторій і габаритної смуги руху збільшуються зі збільшення бази причепів;
- нормоване значення габаритної смуги руху за реальних конструктивних параметрів триланкового метробуса з урахування усіх його можливих обмежень (бази автобуса, розташування точок зчеплення, бази причепа тощо) не може забезпечити триланковий метробус, що розглядається;
- наявність керованого причепа показує на досить складні залежності кутів складання від кута повороту керованих коліс автобуса, проте за обраного передаточного відношення приводу управління метробус не вписується у допустиму смугу руху, регламентовану DIRECTIVE 2002/7/EC. Це необхідно враховувати при проектуванні траси для руху триланкових метробусів.

1. Метробус или новая система автобусного движения. URL: <https://econet.ru/articles/4435-metrobus-ili-novaya-sistema-avtobusnogo-dvizheniya>
2. Сахно В.П. Маневреність метробусів /В.П.Сахно, В.В.Біліченко, В.М.Поляков, О.Є.Омельницький//Вісник машинобудування та транспорту. Вінницький національний технічний університет. – 2018. – №2.
3. 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.
4. Закин Я.Х. Маневренность автомобиля и автопоезда /Я.Х. Закин - М.: Транспорт, 1986. - 137 с.
5. Трехзвенные автопоезда /Я.Е.Фаробин, А.М.Якобашвили, А.М.Иванов и др. Под общ. ред. Я.Е.Фаробина – Машиностроение, 1993. – 224 с.: ил.
6. Перспективные большегрузные автопоезда для евроазиатских перевозок. Топалиди В.А. (УНЦ AIRCUZ "BILIMINTETRANS"). // [www.iru-cis.ru/iru-moscow/](http://www.iru-cis.ru/iru-moscow/) 2007/02\_sr/doc/21/Topalidi\_Uzbekistan\_Rus.pdf/.
7. Сахно В.П. До визначення показників маневреності триланкового причіпного автопоїзда /В.П.Сахно, А.Є.Бондаренко, В.М. Глінчук, І.С Мурований //Автошляховик України. Окремий випуск. Вісник Північного наукового центру ТАУ. – 2006. – Випуск 9. – С.102-108.
8. Сахно В.П. До визначення показників маневреності трьохланкових автопоїздів /В.П. Сахно, І.Ф.Вороніна , В.В.Стельмашук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В.Даля. - 2003. №11 (57). –с.213-218.
9. Сахно В.П. Маневреність триланкових автопоїздів /В.П.Сахно, І.Ф.Вороніна, С.С. Углярниця, В.В.Стельмашук // Автошляховик України. Окремий випуск. Вісник ЦНЦ ТАУ. –2004. Окремий випуск №7. С.118-124.
10. Вороніна І.Ф. Порівняльна оцінка показників маневреності три ланкових автопоїздів різних компоновальних схем /І.Ф.Вороніна, К.В.Шкварко, В.В.Стельмашук // Вісник Національного транспортного університету. – К., 2004. – Вип. 9. – С.165-170.

## REFERENCES

1. Metrobus ili novaya sistema avtobusnogo dvizheniya [A metrobus or a new bus system] Retrieved from <https://econet.ru/articles/4435-metrobus-ili-novaya-sistema-avtobusnogo-dvizheniya> [in Russian].
2. Sakhno V.P., Bilichenko V.V., Polyakov V.M., Omelnytsky O.E. (2018) Manevrenist metrobusiv [Maneuverability of Metrobus] Visnyk mashynobuduvannia ta transport – Journal of Mechanical Engineering and Transport. (Vol. 2) Vinnytsia: Vinnytsia National Technical University [in Ukrainian].
3. Amending Council Directive 96/53 / EC (2002) of 25 July 1996 laying down certain road vehicles vehicles circulating within the Community maximum permitted dimensions for national and international traffic and the maximum authorized weights in international traffic. Official Journal of the European Communities. L67/47-49.
4. Zakin Ya.H. (1986) Manevrennost avtomobilya i avtopoezda [Maneuverability of the car and the trailer]. Moscow: Transport. 137 p.
5. Ya.E.Farobin, A.M. Yakobashvili, A.M. Ivanov, etc. (1993) Trekhzvennyie avtopoezda [Three-axle road trains]. Moscow: Mechanical Engineering. 224 p.
6. Topalidi V.A. Perspektivnyie bolshegruznyie avtopoezda dlya evroaziatskikh perevozk [Promising heavy truck trains for Euro-Asian transportation]. URL: [www.iru-cis.ru/iru-moscow/2007/02\\_sr/doc/21/Topalidi\\_Uzbekistan-Rus.pdf/](http://www.iru-cis.ru/iru-moscow/2007/02_sr/doc/21/Topalidi_Uzbekistan-Rus.pdf/).
7. Sakhno V.P., Bondarenko A.E., Glinchuk V.M., Murovanyj I.S. (2006) Do vyznachennia pokaznykiv manevrenosti trylankovoho prychipnoho avtopoizda [To determination of indicators of maneuverability of a three-lane trailer carriage]. Avtoshliakhovyk Ukrainy. Okremiy vypusk. Visnyk Pivnichnoho naukovoho tsentru TAU – Roadster of Ukraine. Installment. Bulletin of the Northern Scientific Center of TAU. Issue 9. P.102-108 [in Ukrainian].
8. Sakhno V.P., Voronina I.F., Stelmashchuk V.V. (2003) Do vyznachennia pokaznykiv manevrenosti trokhlankovykh avtopoizdiv [To determination of indicators of maneuverability of three-lane road trains] Visnyk

Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V.Dalia. – Bulletin of East-Ukrainian National University named after V. Dahl. Vol. 11 (57). pp.213-218 [in Ukrainian].

9. Sakhno V.P., Voronin I.F., Uglyanitsa S.S., Stelmashchuk V.V. (2004) Manevrenist trylankovykh avtopoizdiv [Maneuverability of three-axle road trains] Avtoshliakhovyk Ukrainy. Okremiy vypusk. Visnyk TsNTs TAU. – Roadster of Ukraine. Installment. Bulletin of TsNTs TAU. Separate Issue №7. pp.118-124 [in Ukrainian].

10. Voronina I.F., Shkvarko K.V., Stelmashchuk V.V. (2004) Porivnialna otsinka pokaznykiv manevrenosti trylankovykh avtopoizdiv riznykh komponovalnykh skhem [Comparative estimation of maneuverability of three-link auto-trains of different layout schemes] Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu – Bulletin National Transport University. Vol.9. pp.165-170 [in Ukrainian].

**Сахно В.П., Мурованый И.С., Стельмашук В.В., Оныщук В.П., Омельницький О.Є. Пути улучшения маневренности метробуса**

Проведенными исследованиями кинематики поворота трехзвенного метробуса установлено, что улучшить показатели маневренности трехзвенного метробуса за счет компоновочных параметров автобуса и прицепных звеньев в предельных режимах движения практически невозможно. Наличие управляемого прицепа показывает на довольно сложные зависимости углов складывания от угла поворота управляемых колес автобуса, однако выбранные передаточные отношения привода управления метробусом не вписывается в допустимую полосу движения, регламентированную DIRECTIVE 2002/7 / ЕС. Это необходимо учитывать при проектировании трассы для движения трехзвенных метробусов.

**Ключевые слова:** автопоезд, прицеп, смещение, траектория, габаритная полоса движения, привод управления, передаточное отношение.

**Sakhno V.P., Murovani I.S., Stelmashchuk V.V., Onyshchuk V.P., Omelnitsky O.E. Ways to improve the maneuverability of the metro bus**

The conducted studies of the kinematics of the turning of the three-axle metro bus have established that it is almost impossible to improve the maneuverability of the three-axle metro bus due to the layout parameters of the bus and the trailer units in the limiting modes of motion. The presence of a managed trailer shows the relatively complex dependencies of the compilation angles on the angle of rotation of the steering wheels, but the selected transmission ratio of the drive control of the metro bus does not fit into the permissible traffic lane, as regulated by DIRECTIVE 2002/7 / EC. This should be taken into account when designing the route for the three-way metro bus.

**Keywords:** train, trailer, displacement, trajectory, overall traffic lane, control drive, gear ratio

**АВТОРИ:**

**САХНО Володимир Прохорович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Автомобілі», Національний транспортний університет, e-mail: [sakhno@ntu.edu.ua](mailto:sakhno@ntu.edu.ua)

**МУРОВАНІЙ Ігор Сергійович**, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький НТУ, e-mail: [igor\\_lntu@ukr.net](mailto:igor_lntu@ukr.net)

**СТЕЛЬМАШУК Валерій Віталійович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький НТУ, e-mail: [val.stelmashchuk@gmail.com](mailto:val.stelmashchuk@gmail.com)

**ОНИЩУК Василь Петрович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький НТУ, e-mail: [fantom.root@gmail.com](mailto:fantom.root@gmail.com)

**ОМЕЛЬНИЦЬКИЙ Олег Євгенович**, аспірант кафедри «Автомобілі», Національний транспортний університет, e-mail: [oleg@autoconsulting.com.ua](mailto:oleg@autoconsulting.com.ua)

**АВТОРЫ:**

**САХНО Владимир Прохорович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Автомобили», Национальный транспортный университет, e-mail: [sakhno@ntu.edu.ua](mailto:sakhno@ntu.edu.ua)

**МУРОВАНЫЙ Игорь Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобилей и транспортных технологий, Луцкий НТУ, e-mail: [igor\\_lntu@ukr.net](mailto:igor_lntu@ukr.net)

**СТЕЛЬМАШУК Валерий Витальевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и транспортных технологий, Луцкий НТУ, e-mail: [cdp@lntu.edu.ua](mailto:cdp@lntu.edu.ua)

**ОНЫЩУК Василий Петрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и транспортных технологий, Луцкий НТУ, e-mail: [fantom.root@gmail.com](mailto:fantom.root@gmail.com)

**ОМЕЛЬНИЦКИЙ Олег Евгеньевич**, аспирант кафедры «Автомобили», Национальный транспортный университет, e-mail: [oleg@autoconsulting.com.ua](mailto:oleg@autoconsulting.com.ua)

**AUTHORS:**

*Volodymyr SAKHNO*, Doctor of Science in Engineering, Professor, Head of Automobiles Department, National Transport University, e-mail: [sakhno@ntu.edu.ua](mailto:sakhno@ntu.edu.ua)

*Igor MUROVANYI*, PhD. in Engineering, Assoc. Professor, Head of Motor Cars and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: [igor\\_lntu@ukr.net](mailto:igor_lntu@ukr.net)

*Valeriy STELMASHCHUK*, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: [cdp@lntu.edu.ua](mailto:cdp@lntu.edu.ua)

*Vasyl ONYSCHUK*, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: [fantom.root@gmail.com](mailto:fantom.root@gmail.com)

*Oleg OMELNITSKY*, Postgraduate Student of Automobiles Department, National Transport University, e-mail: [oleg@autoconsulting.com.ua](mailto:oleg@autoconsulting.com.ua)

Стаття надійшла в редакцію 20.04.2018р.