

О. С. Лиходій, асист., Р. П. Скоков, бакал.

Ключові слова: моделювання динаміки руху, криволінійний рух, седільний автопоїзд, підкерування коліс напівпричепи

Постановка проблеми. Збільшення щільності транспортних потоків, повної маси, швидкостей автомобілів, викликає зростання необхідності у дослідженні та впровадженні новітніх технологій у сфері керованості автотранспорту. Також спостерігається прагнення до скорочення експлуатаційних витрат із метою забезпечення рентабельності перевезень. У зв'язку з цим спостерігається збільшення використання систем автоматичного керування поворотом коліс причіпних ланок. Електронна система керування поворотним пристроєм причепа ETS (Electronic Trailer Steering) – це досконала мікропроцесорна система керування гідравлічним поворотним пристроєм причепа.

Аналіз публікацій. Як науковий напрям питання керованості транспортного засобу (ТЗ) розвинуті такими провідними вченими як Н. Жуковський, Е. Чудаков, Я. Певзнер, А. Литвинов, Я. Фаробін, Д. Антонов, А. Хачатуров, Д. Элліс, М. Оллей, Л. Губер, О. Дітца, П. Рікерт, Т. Шунк, К. Шилінг, І. Рокар, К. Енке, Х. Пасейка, М. Гіспер, П. Зегелар та ін.

Автори у своїх працях не розглянули питання стосовно моделювання криволінійного руху автопоїзда з підкеруванням коліс причіпних ланок. Також представлений принцип моделювання є складним для подальшого програмування у математичних пакетах ЕОМ.

Мета статті. Використовуючи класичні принципи механіки та механізми матричного числення, скласти модель криволінійного руху автопоїзда з підкеруванням коліс причіпних ланок, реалізувати модель у програмному комплексі MATLAB, оцінити якість моделювання.

При моделюванні прийнято такі припущення: рух автомобіля по криволінійній траєкторії характеризується різними видами зв'язку: шини колеса з опорною поверхнею, ходової частини з рамою та трансмісії з ведучими колесами. Дослідження моделі ТЗ, що враховує всі зв'язки, є завданням великої складності.

У рамках його спрощення приймаємо допущення: модель керованого автопоїзда плоска, зв'язки в елементах тягача та напівпричепи голономні, розподіл динамічних вертикальних реакцій між колесами автопоїзда дорівнює статичному, зв'язки шин із дорожньою поверхнею у боковому напрямку нелінійні та допускають ковзання.

Виклад матеріалу. Розглянемо кінематику повороту автопоїзда з урахуванням відведення його коліс, для цього на рисунку 1 наведено розрахункову схему для визначення кінематичних параметрів автопоїзда.

Виходячи з виразу кутової швидкості $\omega_{mz} = V_{mx} / R_l$, одержимо радіус повороту тягача:

$$R_l = \frac{V_{mz}}{\omega_{mz}}. \quad (1)$$

З огляду на $tg(\beta_1) = \frac{V_{my}}{V_{mx}} = \frac{b_1}{R_l}$, зсув центра повороту відносно центра мас тягача дорівнює:

$$b_1 = \frac{V_{my}}{\omega_{mz}} \quad (2)$$

Визначимо кут відведення кожного колеса тягача. Для цього розглянемо лівий і правий борти тягача окремо. Тягач має передній керований міст, кути повороту правого та лівого коліс різні, тому введемо допоміжну величину $\Xi = \Theta + \delta$ для визначення дійсного кута повороту колеса з урахуванням відведення. Приймемо припущення, що колеса задньої осі рухаються без відведення.

$$tg(\Xi_m) = \frac{l_m \cdot \omega_{mz} + V_{my}}{V_{mx} - \omega_{mz} \cdot (K_m - r_m)} \quad (3)$$

де: $l_m = \begin{bmatrix} a_1 & a_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $K_m = 1/2 \cdot \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 \\ K_2 & -K_2 \end{bmatrix}$ – матриці x і y у координат коліс тягача;

$r_m = \begin{bmatrix} r_{om} - (1 - \cos(\Theta_{1L})) & -r_{om} + (1 - \cos(\Theta_{1R})) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ – матриця плеча обкатування;

$\Theta_m = \begin{bmatrix} \Theta_{1L} & \Theta_{1R} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ – матриця кутів повороту коліс тягача;

ω_m – кутова швидкість тягача відносно його центра мас;

V_m – абсолютна швидкість тягача.

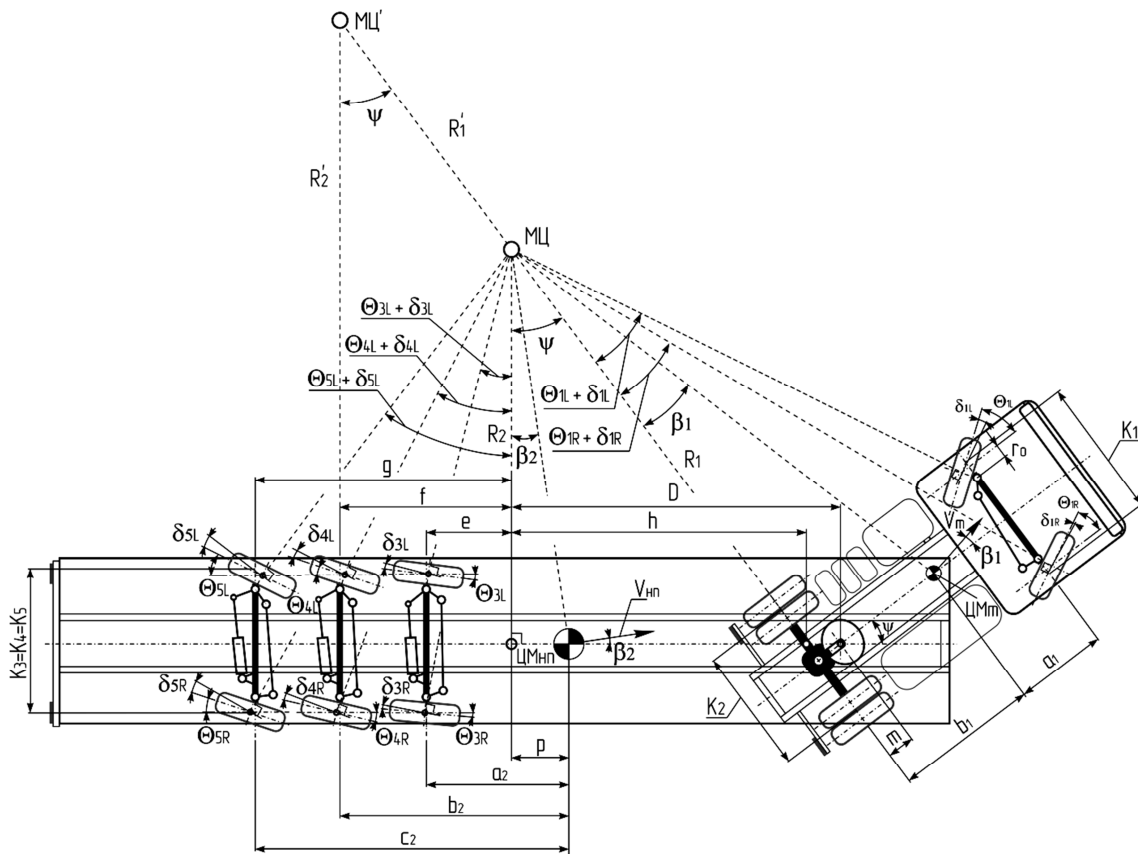


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення кінематичних параметрів автопоїзда

За аналогією з тягачем радіус повороту напівпричепа дорівнює:

$$R_2 = \frac{V_{нпх}}{\omega_{нпз}} \quad (4)$$

Виходячи з того, що $\operatorname{tg}(\beta_2) = \frac{p}{R_2} = \frac{V_{нпу}}{V_{нпх}}$, зсув центра повороту напівпричепа дорівнює:

$$p = \frac{V_{нпу}}{\omega_{нпз}}, \quad (5)$$

Формування матриці кутів повороту коліс напівпричепа здійснюється такими чином:

$$\Theta_{3L} = \operatorname{arccctg} \left(\frac{d \cdot \operatorname{Ctg}(\psi) - m / \sin(\psi) - K_3 / 2}{e} \right); \quad (6)$$

$$\Theta_{3R} = \text{arccctg} \left(\text{Ctg}(\Theta_{3L}) + \frac{K_3}{e} \right).$$

Виходячи з теорії автомобіля, визначимо сили, що діють на автопоїзд (рис. 2).

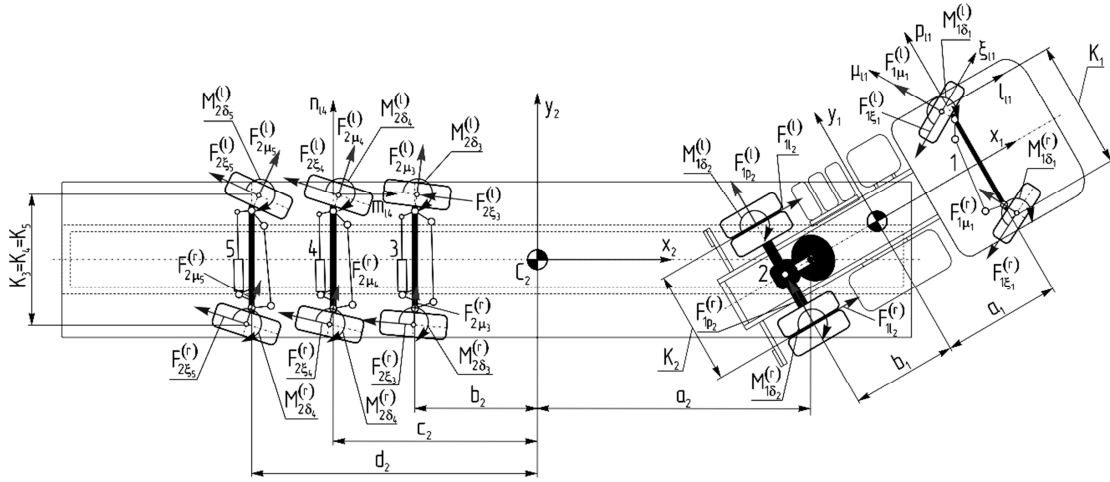


Рис. 2. Схема сил, що діють на автопоїзд при повороті

Моделювання руху автопоїзда здійснювалось на основі двох основних принципів теоретичної механіки: зміни кількості руху та моменту кількості руху системи. Після відповідних перетворювань отримаємо два рівняння поступального руху:

$$\begin{cases} (V_{m_x} - \omega_m \cdot V_{m_y}) \cdot (m_m + m_{\text{НП}}) + m_{\text{НП}} \cdot (\omega_m^2 \cdot e_m + \omega_{\text{НП}} \cdot e_{\text{НП}} \cdot \text{Sin}(\psi) + \omega_{\text{НП}}^2 \cdot e_{\text{НП}} \cdot \text{Cos}(\psi)) \\ = \sum_k F_{m_{xk}}^e + \left(\sum_k F_{\text{НП}_{xk}}^e \cdot \text{Cos}(\psi) - \sum_k F_{\text{НП}_{yk}}^e \cdot \text{Sin}(\psi) \right) \\ (V_{m_y} - \omega_m \cdot V_{m_x}) \cdot (m_m + m_{\text{НП}}) - m_{\text{НП}} \cdot (\omega_m \cdot e_m + \omega_{\text{НП}} \cdot e_{\text{НП}} \cdot \text{Cos}(\psi) - \omega_{\text{НП}}^2 \cdot e_{\text{НП}} \cdot \text{Sin}(\psi)) \\ = \sum_k F_{m_{yk}}^e + \left(\sum_k F_{\text{НП}_{xk}}^e \cdot \text{Sin}(\psi) + \sum_k F_{\text{НП}_{yk}}^e \cdot \text{Cos}(\psi) \right) \end{cases} \quad (7)$$

де: m – повна маса тягача (напівпричепа);

e – відстань від точки зчипки до центрів мас відповідно тягача (напівпричепа);

F – матриця зовнішніх та внутрішніх сил, що приведені до центра мас тягача (напівпричепа), та два рівняння руху по колу:

$$\begin{aligned} I_m \cdot \dot{\omega}_m + m_m \cdot e_m \cdot (\dot{V}_{m_y} + \omega_m \cdot V_{m_x}) &= (\{CM_x\} + e_m) \cdot \{F_{TRy}\} - \{CM_y\} \cdot \{F_{TRx}\} = M_{TRp} \\ (I_{\text{НП}} + m_{\text{НП}} \cdot e_{\text{НП}}^2) \cdot \dot{\omega}_{\text{НП}} + m_{\text{НП}} \cdot e_{\text{НП}} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} \dot{\omega}_m \\ \omega_m^2 \end{bmatrix} \cdot e_m + \begin{bmatrix} -\dot{V}_{m_y} \\ \dot{V}_{m_x} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{m_x} \\ V_{m_y} \end{bmatrix} \cdot \omega_m \right\}^T \cdot \begin{bmatrix} \text{Cos}(\psi) \\ \text{Sin}(\psi) \end{bmatrix} &= \quad (8) \\ = (\{CM_{x'}\} - e_{\text{НП}}) \cdot \{F_{STy'}\} - \{CM_{y'}\} \cdot \{F_{STx'}\} &= M_{STp} \end{aligned}$$

Отримані системи рівнянь подано у матричній формі:

$$\begin{bmatrix} (m_m + m_{\text{НП}}) & 0 & 0 & (m_{\text{НП}} \cdot e_{\text{НП}} \cdot \text{Sin}(\psi)) \\ 0 & (m_m + m_{\text{НП}}) & (m_m \cdot e_m) & (-m_{\text{НП}} \cdot e_{\text{НП}} \cdot \text{Cos}(\psi)) \\ 0 & (-m \cdot e_m) & (I_m) & (m_{\text{НП}} \cdot e_{\text{НП}} \cdot e_m \cdot \text{Cos}(\psi)) \\ (m_{\text{НП}} \cdot e_{\text{НП}} \cdot \text{Sin}(\psi)) & (-m_{\text{НП}} \cdot e_{\text{НП}} \cdot \text{Cos}(\psi)) & 0 & (I_{\text{НП}} + m_{\text{НП}} \cdot e_{\text{НП}}^2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{V}_{m_x} \\ \dot{V}_{m_y} \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\omega}_{\text{НП}} \end{bmatrix} = \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} F_x^e + \omega_m \cdot V_{m_y} \cdot (m_m + m_{\text{НП}}) - m_{\text{НП}} \cdot (\omega_m^2 \cdot e_m + \omega_{\text{НП}}^2 \cdot e_{\text{НП}} \cdot \text{Cos}(\psi)) \\ F_y^e - \omega_m \cdot V_{m_x} \cdot (m_m + m_{\text{НП}}) - \omega_{\text{НП}}^2 \cdot m_{\text{НП}} \cdot e_{\text{НП}} \cdot \text{Sin}(\psi) \\ M_{\text{TR}_p} - V_{m_x} \cdot \omega_m \cdot m_m \cdot e_m \\ M_{\text{ST}_p} - \omega_m \cdot m_{\text{НП}} \cdot e_{\text{НП}} \cdot ((\omega_m \cdot e_m - V_{m_y}) \cdot \text{Sin}(\psi) - V_{m_x} \cdot \text{Cos}(\psi)) \end{bmatrix}$$

Розглянута розрахункова методика визначення параметрів криволінійного руху автопоїзда реалізована у математичному пакеті MATLAB, та забезпечує визначення його місця розташування (координат) відносно початку глобальної системи координат. На рисунках 3 – 5 як приклад показано результати віртуальних заїздів досліджуваного автопоїзда по колу.

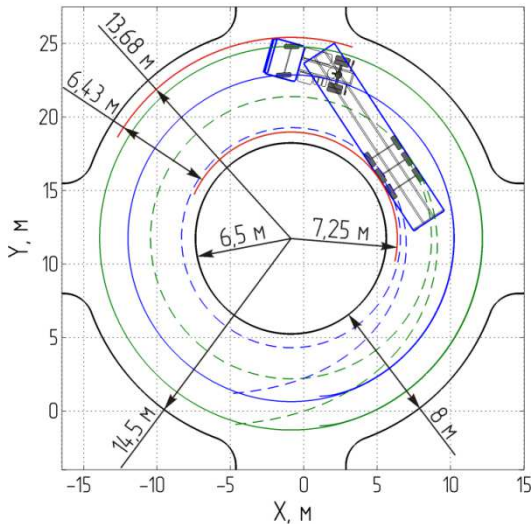


Рис. 3. Рух по колу без підкерування коліс напівпричепи

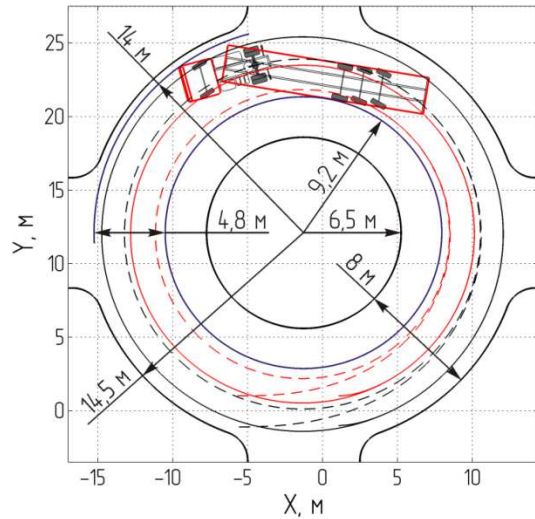


Рис. 4. Рух по колу з підкеруванням коліс напівпричепи в одному напрямку

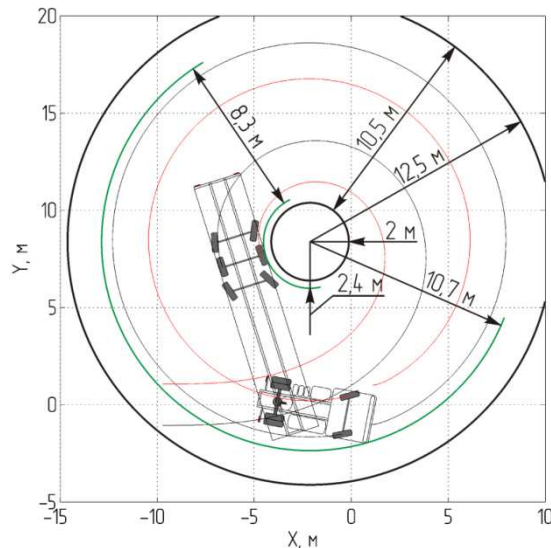


Рис. 5. Рух по колу з підкеруванням коліс напівпричепи у різних напрямках

Висновки. Програмний модуль, створений на основі викладеної методики, є універсальним і може використовуватись для дослідження в першому наближенні керуваності будь-якого дволанкового рухомого складу.

У статті викладено теоретичні положення прогнозування керуваності моделі автопоїзда, що враховує конструктивні параметри (габаритні розміри, кількість коліс та розподіл ваги по колесах), розподіл кутів повороту керуваних коліс, стаціонарну нелінійність зв'язку шин

(зчеплення в контактних точках шини, кути відведення та стабілізуючі моменти кожного з коліс) із дорожньою поверхнею. Врахування ряду конструктивних параметрів обмежено постановкою задачі у площині. Отже, дана модель може використовуватися для попередньої оцінки керованості автомобіля і є проміжною при вирішенні питання у рамках плоскої задачі.

Унікальність та універсальність моделі автопоїзда підкреслюється представленням її у матричному вигляді, що є більш зручним для швидкості розрахунків та програмування у середовищі MATLAB. Віртуальна модель автопоїзда передбачає подальший її розвиток та ускладнення, а саме – розгляд гальмівної динаміки, врахування реакції водія та перерозподілу ваги.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Литвинов А. С.** Управляемость и устойчивость автомобиля. – М. : Машиностроение, 1971. – 416 с.
2. **Эллис Д. Р.** Управляемость автомобиля [Пер. с англ.]. – М. : Машиностроение, 1975. – 216 с.
3. **Расејка Н. В.** Tyre and vehicle dynamics. SAE, Warrendale, 2002. – 622 с.
4. **Дячук М. В.** Оптимизация конструктивных параметров неразрезной рулевой трапеции автомобиля / М. В. Дячук, А. С. Лиходей // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2007. – № 12. – С. 42 – 49
5. **Леви-Чевита Т., Амальди У.** Курс теоретической механики. [Пер. с итал. Д. И. Кутилина]. – М. : Издательство иностранной литературы, 1951. – 326 с.

УДК 629.35.3.072.1

Моделювання керованості автопоїзда з підкеруванням коліс причепних ланок / О. С. Лиходій, Р. П. Скоков // Вісник Придніпровської академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2013. – № 8. – С. 38 – 42. – рис. 5. –Бібліогр.: (5 назв).

Розглянуто необхідність дослідження та впровадження новітніх технологій у сфері керованості автотранспорту. Досліджується кінематика повороту автопоїзда з урахуванням відведення його коліс, наводиться розрахункова схема для визначення кінематичних параметрів автопоїзда.

Ключові слова: моделювання динаміки руху, криволінійний рух, сідельний автопоїзд, підкерування коліс напівпричепи.

Моделирование управляемости автопоезда с подуправлением колес прицепа / А. С. Лиходей, Р. П. Скоков // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПГАСА, 2013. – № 8. – С. 38 – 42. – рис. 5. – Библиогр.: (5 назв.).

Рассмотрена необходимость исследования и внедрения новейших технологий в сфере управляемости автотранспорта. Исследуется кинематика поворота автопоезда с учетом отвода его колес, приводится расчетная схема для определения кинематических параметров автопоезда.

Ключевые слова: моделирование динамики движения, криволинейное движение, сидельный автопоезд, подруливание колес полуприцепа.

Simulation of control train with a running wheel trailer units / A. Lihodei, R. Skokov // Visnyk of Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. – D. : PSACEA, 2013. – № 8. – P. 38 – 42. – pic. 5. – Bibliogr.: (5 names).

The necessity of research and the latest technologies in the field of handling vehicles. The kinematics of turning trains considering removal of the wheels , the design scheme is given for the determination of kinematic parameters of trains.

Keywords: modeling the dynamics of motion, curvilinear motion, tractor trailer, semi-trailer wheels under control.