

Сахно В.П.¹, д.т.н., Кузнєцов Р.М.², к.т.н., Онищук В.П.²

1 — Національний транспортний університет, м. Київ;
2 — Луцький національний технічний університет, м. Луцьк

ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ МАНЕВРНОСТІ АВТОПОЇЗДА-КОНТЕЙНЕРОВОЗА

Наведено методику визначення показників маневрності автопоїзда-контейнеровоза як з некерованим, так і з керованим напівпричепом.

Вступ

У більшості країн світу габаритна довжина сидельних автопоїздів обмежується на рівні 16,5 м, хоч і зустрічаються конструкції довжиною до 22 м. Пояснюється це необхідністю виконання вимог DIRECTIVE 2002/7/EC, зокрема п. 5.9.1 щодо габаритної смуги руху (ГСР), яка повинна бути у межах 7,2 м (за зовнішнього габаритного радіуса 12,5 м і внутрішнього габаритного радіуса 5,3 м).

У роботі [1] розглянуто загальну компоновальну схему автопоїзда, довжина якого складає 22 м, що дозволено Правилами дорожнього руху в Україні.

Необхідно визначити, за яких конструктивних параметрів тягача і напівпричепи такий автопоїзд буде задовольняти вимогам DIRECTIVE 2002/7/EC, що і є *метою* даної роботи.

Основна частина

Проведеними раніше дослідженнями [2-7] доведено, що ГСР автопоїзда можна визначати за жорсткими у бічному напрямку колесами, при цьому похибка результатів такого визначення не перевищує 13 %.

На рис. 1 наведено схему повороту автопоїзда-контейнеровоза з некерованими осями шасі (друга або третя вісь) і некерованими осями напівпричепи, який у подальшому приймаємо як основний для порівняння.

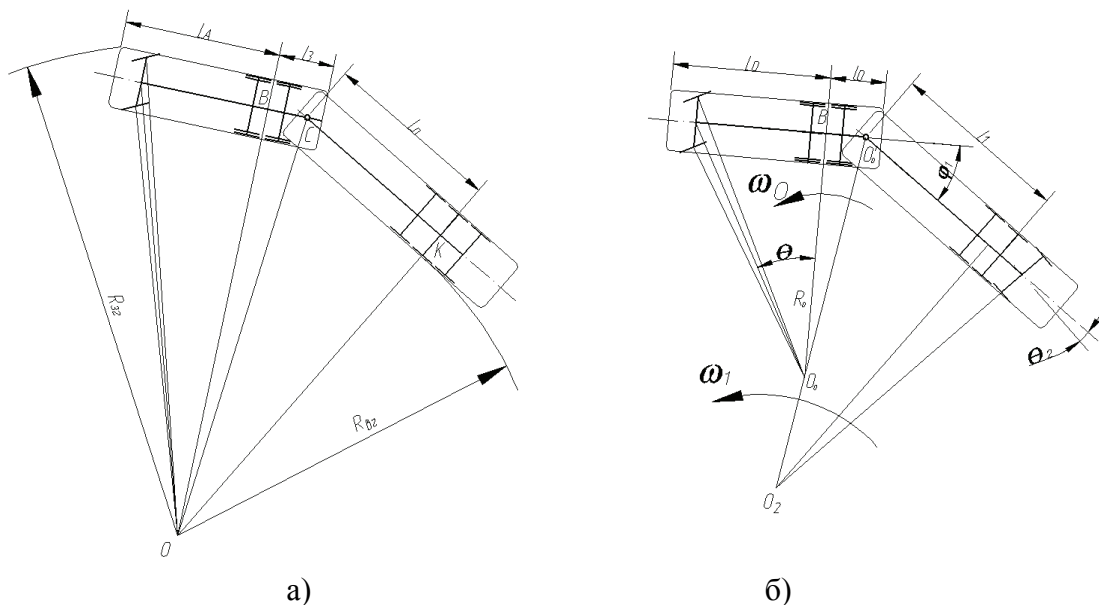


Рис. 1. Схема усталеного повороту автопоїзда-контейнеровоза з некерованим (а) і керованим (б) напівпричепом

Позначимо через L_A відстань від площини, в якій знаходиться зовнішня габаритна точка, до характерної точки шасі (точки, що знаходиться посередині між задніми осями автомобіля-тягача). Ця відстань для шасі P230 CB6×4ENZ [1] складає 8008 мм. Якщо прийняти внутрішній габаритний радіус $R_{вг}= 5,3$ м, то послідовно, визначаючи із Δ ОКС відстань ОС, а із Δ ОВС відстань ОВ, отримаємо зовнішній габаритний радіус $R_{зг}= 12,81$ м, що не задовольняє вимогам DIRECTIVE 2002/7/EC.

Проведеними раніше дослідженнями [2-3] показано, що вирішення питання щодо відповідності автопоїзда-контейнеровоза вимогам DIRECTIVE 2002/7/EC можливе за умови застосування керованих осей автомобіля-тягача або напівпричепа. При цьому можливі такі дві компоновальні схеми:

- шасі автомобіля-тягача має задню керовану (самоустановлювальну) вісь;
- напівпричіп автопоїзда-контейнеровоза має задню керовану (самоустановлювальну) вісь.

Більш загальним випадком є автопоїзд з керованим напівприцепом, який і розглянемо у подальшому.

У роботі [3] наведено методику розрахунку ГСР автопоїзда з некерованим напівприцепом. Базуючись на положеннях цієї роботи, розглянемо загальний випадок руху автопоїзда-контейнеровоза з керованим напівприцепом.

Будемо вважати, що траєкторія характерної точки автомобіля-тягача задана у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= X_1(t) \\ Y_1 &= Y_1(t) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

а траєкторію характерної точки напівпричепа необхідно визначити, тобто

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= X_2(t) \\ Y_2 &= Y_2(t) \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Визначимо швидкості характерних точок автомобіля-тягача і візка напівпричепа. Отримаємо:

$$\bar{V}_1 = \dot{X}_1 \times \bar{i} + \dot{Y}_1 \times \bar{j}, \quad (3)$$

$$\bar{V}_2 = \dot{X}_2 \times \bar{i} + \dot{Y}_2 \times \bar{j}, \quad (4)$$

або

$$|\bar{V}_2| = \sqrt{\bar{X}_2^2 + \bar{Y}_2^2}. \quad (5)$$

З використанням координат характерних точок базу напівпричепа можна записати у вигляді

$$L = (X_1 - X_2)\bar{i} + (Y_1 - Y_2)\bar{j}, \quad (6)$$

де

$$|\bar{BA}| = L. \quad (7)$$

Знайдемо проекцію вектора \bar{V}_1 на вісь, що проходить через характерні точки тягача і напівпричепа, тобто на вісь AB . Отримаємо:

$$\bar{V}_{1AB} = \frac{\dot{X}_1(X_1 - X_2) + \dot{Y}_1(Y_1 - Y_2)}{L}. \quad (8)$$

Зауважимо, що
або

$$|V_2| = \bar{V}_{1AB} \quad (9)$$

$$|\bar{V}_2| = kL. \quad (10)$$

З урахуванням виразів (8) та (9) коефіцієнт пропорційності k визначиться як

$$k = \frac{\dot{X}_1(X_1 - X_2) + \dot{Y}_1(Y_1 - Y_2)}{L^2}. \quad (11)$$

Після підстановки рівняння (11) в рівняння (10) отримаємо систему двох диференціальних рівнянь для визначення координат характерної точки напівпричепа $X_2(t)$, $Y_2(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{X}_2 &= (X_1 - X_2) \times \frac{\dot{X}_1(X_1 - X_2) + \dot{Y}_1(Y_1 - Y_2)}{L^2}; \\ \dot{Y}_2 &= (Y_1 - Y_2) \times \frac{\dot{X}_1(X_1 - X_2) + \dot{Y}_1(Y_1 - Y_2)}{L^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для спрощення системи (12) проведемо заміни:

$$X_1 - X_2 = L \times u(t); \quad (13)$$

$$Y_1 - Y_2 = L \times v(t).$$

Звідки

$$X_2 = X_1 - L \times u(t); \quad (14)$$

$$Y_2 = Y_1 - L \times v(t).$$

Візьмемо похідну від змінних системи рівнянь (14). При цьому позначимо $u(t)=u$, $v(t)=v$. Отримаємо:

$$\begin{aligned} \dot{X}_2 &= \dot{X}_1 - L \times \dot{u}; \\ \dot{Y}_2 &= \dot{Y}_1 - L \times \dot{v}. \end{aligned} \quad (15)$$

Після підстановки рівнянь (12) і (15) в рівняння (14) отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_1 - L\dot{u} &= u(\dot{X}_1 u + \dot{Y} v) \\ \dot{Y}_1 - L\dot{v} &= v(\dot{X}_1 u + \dot{Y} v) \end{aligned} \right\}$$

або

$$\begin{aligned} \dot{u} &= -\frac{1}{L}[(u^2 - 1)\dot{X}_1 + uv\dot{Y}_1]; \\ \dot{v} &= -\frac{1}{L}[uv\dot{X}_1 + (v^2 - 1)\dot{Y}_1]. \end{aligned} \quad (16)$$

Після знаходження будь-яким методом допоміжних функцій u і v із системи рівнянь (16) отримаємо рівняння для визначення траєкторії характерної точки напівпричепа у всіх стадіях повороту автопоїзда.

Для автопоїзда з керованим напівприцепом габаритні радіуси повороту і ГСР можна визначити за умови, що визначені кутом складання автопоїзда.

Диференціальне рівняння кута складання автопоїзда-контейнеровоза з керованим напівприцепом (рис.1 б), записується у вигляді [4]:

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \omega_0 \left[1 - \frac{L_0 \sin\left(\frac{\phi_1}{i_1} - \alpha_0\right)}{L_1 \operatorname{tg}\theta \cos \alpha_0 \cos\left(\frac{\phi_1}{i_1} - \phi_1\right)} \right], \quad (17)$$

де $\omega_0 = \frac{v_0 \operatorname{tg}\theta}{L_0}$ — кутова швидкість повороту автомобіля-тягача;

L_0 — база автомобіля-тягача;

θ — середній кут повороту керованих коліс автобуса;

L_1 — база причепа;

c_0 — відстань від характерної точки автомобіля-тягача до точки зчипки з напівпричепом;

$R_0 = \frac{L_0}{\operatorname{tg}\gamma_0}$ — миттєвий центр повороту автомобіля-тягача;

$\alpha_0 = \operatorname{arctg} \frac{c_0}{R_0}$ — кут, що визначає положення точки зчипки автомобіля-тягача і напів-

причепа;

i_1 — передаточне відношення приводу управління задньою віссю (колесами) напівпричепа.

Розв'язок цього рівняння можливий лише за умови його лінеаризації, яку можливо виконати, якщо прийняти, що швидкість і кутова швидкість повороту автопоїзда величини сталі й визначена фаза його повороту.

Автопоїзд на повороті може знаходитися в одній із чотирьох фаз руху [4, 6]:

1. Вхідна перехідна траєкторія — рівномірний поворот керованих коліс автомобіля-тягача $\theta = \dot{\theta}t$. При цьому поворот керованих коліс продовжується до того часу, поки зовнішня габаритна точка автомобіля-тягача не почне рухатися по дузі кола радіусом 12,5 м. Для першої фази повороту кут складання θ визначається як

$$\phi_1 = \frac{(L_1 + c)i_1}{L_0} \times \left\{ \theta - L_1 i_1 k_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta}{L_1 i_1 k_1}\right) \right] \right\}, \quad (18)$$

де k_1 — режимний коефіцієнт при вході автопоїзда в поворот.

Оскільки найбільша смуга руху, як показали проведені раніше дослідження [3], досягається на кругових траєкторіях при режимному коефіцієнті повороту, що наближається до нескінченності, розглянемо саме цей випадок, тобто рух автомобіля-тягача по круговій траєкторії, а напівпричепа — по перехідній траєкторії.

Рівняння руху характерної точки тягача під час його руху по круговій траєкторії запишемо у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= R \cos t \\ Y_1 &= R \sin t \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

Розглянемо більш детально кругову траєкторію автомобіля-тягача. Для цього продиференціюємо рівняння (19). Отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_1 &= -R \sin t \\ \dot{Y}_1 &= R \cos t \end{aligned} \right\}. \quad (20)$$

Після підстановки рівнянь (19) і (20) в рівняння (15) і (16) отримаємо:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \frac{R}{L} [(u^2 - 1) \sin t - uv \cos t], \\ \dot{v} &= \frac{R}{L} [uv \sin t - (v^2 - 1) \cos t]; \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} \dot{u} &= a [(u^2 - 1) \sin t - uv \cos t], \\ \dot{v} &= a [uv \sin t - (v^2 - 1) \cos t]; \end{aligned} \quad (21)$$

а також

$$\begin{aligned} X_2 &= L(a \cos t - u), \\ Y_2 &= L(a \sin t - v), \end{aligned} \quad (22)$$

$$\text{де } a = \frac{R}{L}.$$

Після визначення допоміжних змінних u і v рівняння для визначення координат характерної точки напівпричепа запишуться у вигляді

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= L[a \cos t - \sin(2 \operatorname{arctg} z - t)] \\ Y_2 &= L[a \sin t - \cos(2 \operatorname{arctg} z - t)] \end{aligned} \right\}, \quad t \in [0; \frac{\pi}{2}], \quad (23)$$

$$\text{де } z = (a - k) - \frac{2k}{\frac{a+k}{a-k} e^{kt} - 1}. \quad (24)$$

Цей рух продовжується до того часу, поки сумарний кут повороту автопоїзда γ , що визначається від початку повороту, не стане рівним $\gamma_2 = \beta - \phi$ (β — заданий кут повороту автопоїзда; ϕ — кут повороту тягача в кінці першої фази). Кут складання автопоїзда визначиться як

$$\phi_1 = \phi_1(\tau_1) \exp\left(-\frac{R_0 \beta}{L_1 i_1}\right) + \frac{(L_1 + c) i_1}{L_0} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{R_0 \beta}{L_1 i_1}\right) - \theta' \right\}. \quad (25)$$

На початку виходу автопоїзда з кругової траєкторії поворот керованих коліс продовжується до моменту, поки $\gamma_0 = \gamma'_0 - \dot{\gamma}_0 t = 0$, тобто кут повороту керованих коліс автомобіля-тягача не стане дорівнювати нулю. Кут складання у цій фазі визначиться як

$$\phi_1 = \phi_1(\tau_2) \exp\left(-\frac{\theta' - \theta}{L_1 i_1 k_2}\right) + \frac{(L_1 + c) i_1}{L_0} \times \left\{ \theta + L_1 i_1 k_2 \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta' - \theta}{L_1 i_1 k_2}\right) \right] - (\theta' - \theta) \right\}, \quad (26)$$

де k_2 — режимний коефіцієнт при виході автопоїзда з повороту.

На наступному етапі, коли автомобіль-тягач рухається по прямій виходу із повороту, із рівняння (20) отримаємо:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= -R; \\ \dot{Y} &= 0. \end{aligned} \quad (27)$$

У результаті інтегрування системи рівнянь (27) отримаємо:

$$\begin{aligned} X_2 &= -L \left[a - \left(t - \frac{\pi}{2} \right) + \cos(2 \operatorname{arctg} \frac{1}{z_n}) e^{a(t - \frac{\pi}{2})} \right]; \\ Y_2 &= L \left[a - \sin(2 \operatorname{arctg} \frac{1}{z_n}) e^{a(t - \frac{\pi}{2})} \right]. \end{aligned} \quad (28)$$

За прямолінійного руху автомобіля-тягача $\theta = 0$. Кут складання визначиться як

$$\phi_1 = \phi_1(\tau_3) \exp\left(-\frac{S}{L_1 i_1}\right). \quad (29)$$

Отримані рівняння для координат характерних точок автомобіля-тягача і напівпричепа, кута складання автопоїзда дозволяють за відомого передаточного відношення приводу управління віссю напівпричепа визначити габаритні радіуси і ГСР.

Розглянута методика визначення координат характерних точок автомобіля-тягача і напівпричепа справедлива також і у разі некерованих осей напівпричепа і керованої третьої осі автомобіля-тягача. Схема з керованою віссю тягача має ті переваги, що у модельному ряду автомобілів провідних компаній світу є моделі з керованими задніми осями тягача. Для компанії Scania — це автомобіль-тягач P230 CB6×2*4HNA [1].

На рис. 2 в якості прикладу наведено траєкторії руху ланок автопоїзда, тягач якого має передню і задню керовану вісь (схема с). Ці траєкторії побудовані з використанням програмного забезпечення компанії Scania. Аналогічні траєкторії отримані й для усіх інших схем автопоїзда-контейнеровоза, а саме з некерованою третьою віссю тягача і керованим напівприцепом за постійного передаточного відношення приводу управління (схема б) з некерованою третьою віссю тягача і некерованим напівприцепом (схема а).

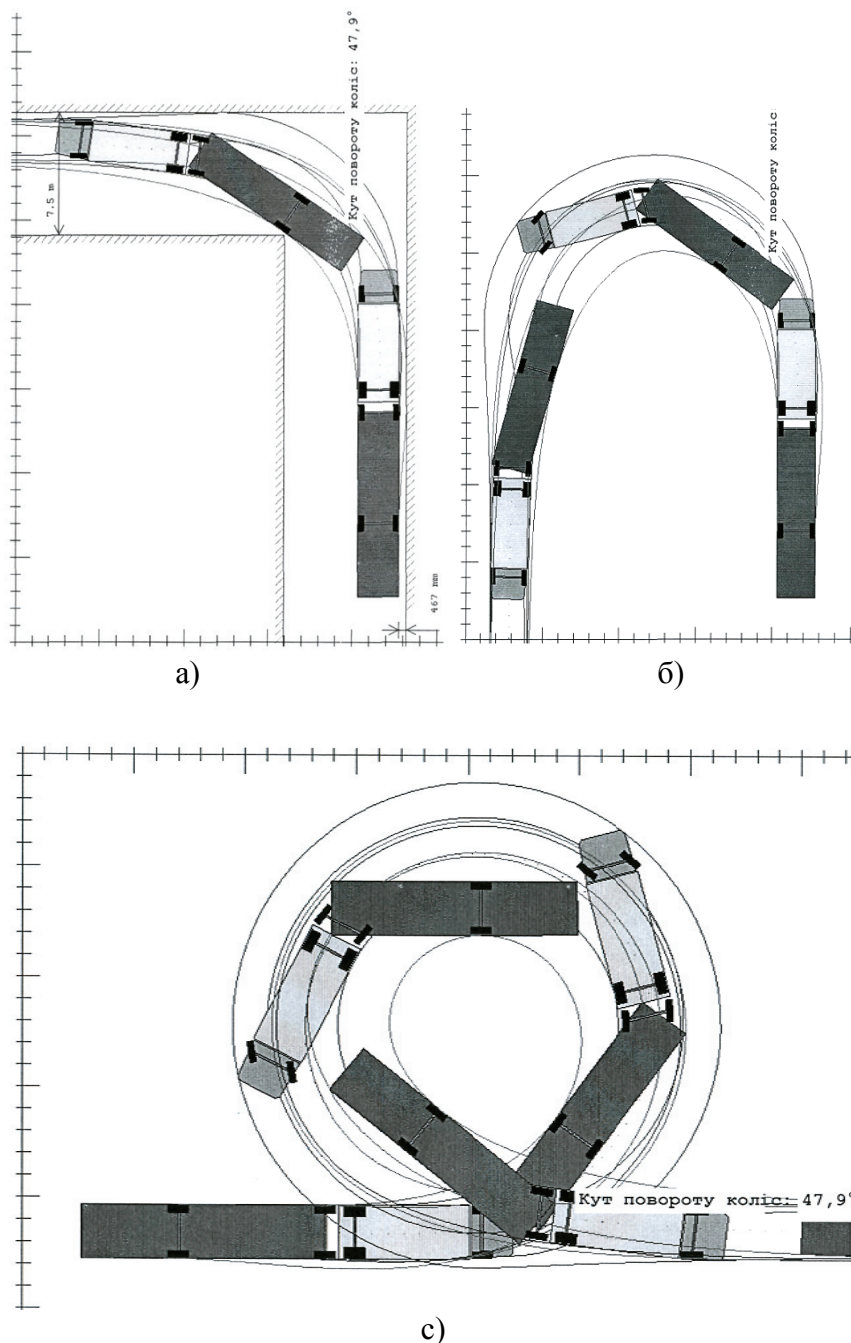


Рис. 2. Траєкторії руху автопоїзда з керованими передньою і задньою віссю автомобіля-тягача за різних типів повороту

У табл. 1 представлено габаритні радіуси повороту $R_{вг}$ і $R_{зг}$ та габаритна смуга руху $B_{г}$ у мм при повороті автопоїзда на 90° , 180° і 360° за швидкості руху 5 м/с. Аналіз приведених даних показує, що прийняті компоновальні схеми автопоїздів з керованими передньою і задньою віссю тягача, керованою задньою віссю напівпричепа навіть за постійного передаточного відношення приводу управління забезпечують прийнятну вписуваність автопоїзда у найбільш типових умовах руху — поворотах на 90° , 180° і 360° .

Таблиця 1

До визначення показників маневреності автопоїзда-контейнеровоза

Схема автопоїзда	Поворот автопоїзда								
	90°			180°			360°		
	$R_{вг}$	$R_{зг}$	$B_{г}$	$R_{вг}$	$R_{зг}$	$B_{г}$	$R_{зг}$	$R_{зг}$	$B_{г}$
№ 1	4016	11105	7089	4016	11212	7126	4016	11244	7198
№ 2	4095	11093	6998	4095	11116	7021	4095	11183	7088
№ 4	3887	11100	7213	3887	11232	7345	3887	11328	7441

Висновки

Показано, що прийняті компоновальні схеми автопоїздів-контейнеровозів з керованими передньою і задньою віссю тягача або з керованою задньою віссю напівпричепа за визначеного передаточного відношення приводу управління, забезпечують прийнятну вписуваність автопоїзда у найбільш типових умовах руху — поворотах на 90° , 180° і 360° .

Список літератури

1. Сахно В.П. До визначення конструктивних і компоновальних параметрів автопоїзда-контейнеровоза / В.П. Сахно, В.П. Онищук, В.М. Придюк // Вісник НТУ. — К.: НТУ, 2009. — № 18.
2. 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. — P. 47-49.
3. Трехзвенные автопоезда / Я.Е. Фаробин, А.М. Якобашвили, А.М. Иванов и др.; под общ. ред. Я.Е. Фаробина. — Машиностроение, 1993. — 224 с.
4. Закин Я.Х. Маневренность автомобиля и автопоезда / Я.Х. Закин. — М.: Транспорт, 1986. — 137 с.
5. Беленький Ю.Б. Расчет ширины коридора вписывания автопоезда в поворот с применением ЭЦВМ / Ю.Б. Беленький, А.Б. Азбель, А.В. Жуков // Автомобильная промышленность. — 1976. — №2. — С. 24-25.
6. Сахно В.П. До визначення габаритної смуги руху трьохланкових автопоїздів / В.П. Сахно, І.Ф. Вороніна, С.С. Угляниця, В.В. Стельмашук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. — 2004. — №7 (77) (Частина 1). — С. 30-36.
7. Енглезі О.А. Дослідження кінематики повороту автопоїзда на фізичній моделі / О.А. Енглезі // Управління проектами, системний аналіз і логістика. — К.: НТУ. — 2007. — Вип. 5.

Стаття надійшла до редакції 17.07.10
© Сахно В.П., Кузнецов Р.М., Онищук В.П., 2010