

УДК 629.113

В.П.Сахно, Р.М.Кузнєцов, В.П.Онищук

**ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ МАНЕВРНОСТІ АВТОПОЇЗДА-КОНТЕЙНЕРОВОЗА**

*У роботі наведено методика визначення показників маневрності автопоїзда-контейнеровоза як з некерованим, так і керованим напівприцепом.*

Ключові слова: автопоїзд-контейнеровоз, напівприцеп.

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.п.5.9.1 щодо габаритної смуги руху (ГСР), яка повинна бути у межах 7,2 м (за зовнішнього габаритного радіусу 12,5 м і внутрішнього габаритного радіусу 5,3 м).

У роботі [1] розглянута загальна компоновальна схема автопоїзда, довжина якого складає 22 м, що дозволено Правилами дорожнього руху в Україні. Необхідно визначити, за яких конструктивних параметрів тягача і напівпричепа 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 жорстких у бічному напрямку колесах, при цьому похибка результатів такого визначення не перевищує 13%.

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

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  $R_{вн} = 5,3$  м, то послідовно визначаючи із  $\Delta$  ОКС відстань ОС, а із  $\Delta$ ОВС відстань ОВ, отримаємо зовнішній габаритний радіус  $R_{зн} = 12,81$  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] наведена методика 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

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

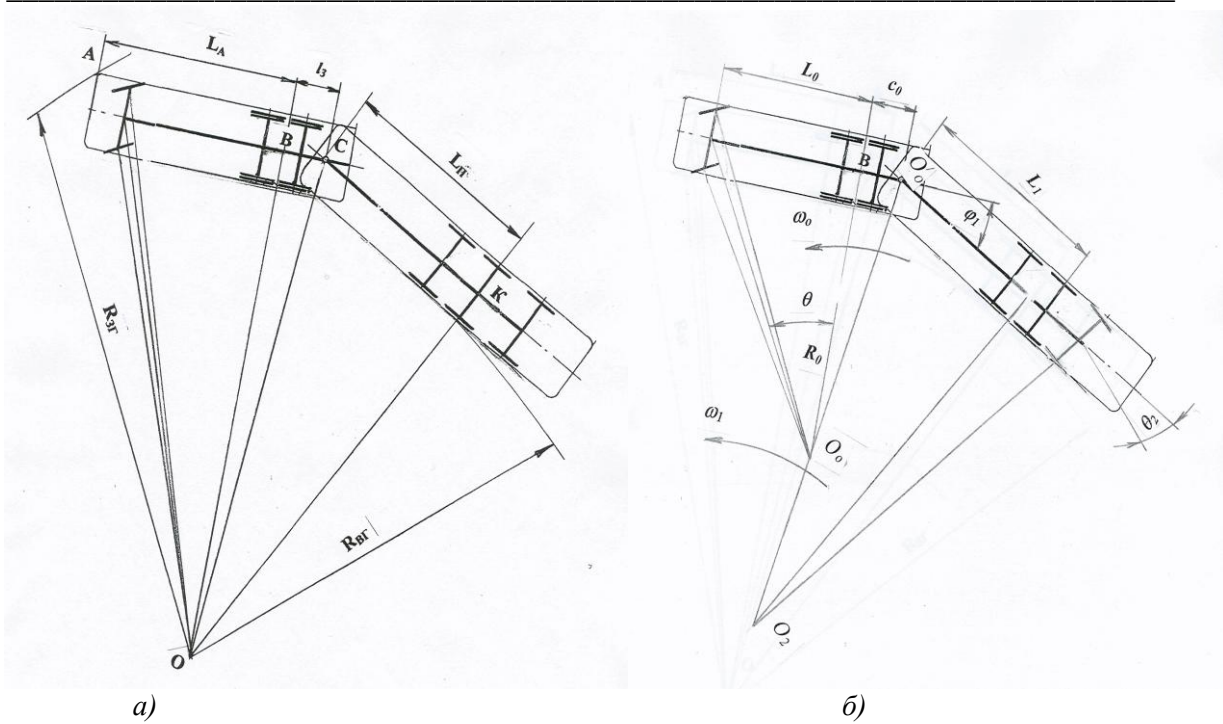


Рис. 1. Схема усталеного повороту автопоїзда-контейнеровоза з некерованим (а) і керованим (б) напівприцепом

Визначимо швидкості характерних точок автомобіля-тягача і возика напівпричепи. Отримаємо

$$\vec{V}_1 = \dot{X}_1 \times \vec{i} + \dot{Y}_1 \times \vec{j}, \tag{3}$$

$$\vec{V}_2 = \dot{X}_2 \times \vec{i} + \dot{Y}_2 \times \vec{j}, \tag{4}$$

або

$$(\vec{V}_2) = \sqrt{\dot{X}_2^2 + \dot{Y}_2^2}. \tag{5}$$

З використанням координат характерних точок базу напівпричепи можна записати у вигляді

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

$$\text{де } (\vec{BA}) (= L) \tag{7}$$

Знайдемо проекцію вектора  $\vec{V}_1$  на вісь, що проходить через характерні точки тягача і напівпричепи, тобто на вісь АВ. Отримаємо:

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

Помітимо, що

$$(V_2) = \vec{V}_{1AB} \tag{9}$$

або

$$(\vec{V}_2) = kL \tag{10}$$

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

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

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

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

Для спрощення системи (12) проведемо заміни:

$$\begin{aligned}X_1 - X_2 &= L \times u(t), \\ Y_1 - Y_2 &= L \times v(t).\end{aligned}\quad (13)$$

Звідки

$$\begin{aligned}X_2 &= X_1 - L \times u(t), \\ Y_2 &= Y_1 - L \times v(t).\end{aligned}\quad (14)$$

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

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

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

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

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 визначено кут складання автопоїзда.

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

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \omega_0 \left[ 1 - \frac{L_0 \sin\left(\frac{\varphi_1}{i_1} - \alpha_0\right)}{L_1 \operatorname{tg}\theta \cos\alpha_0 \cos\left(\frac{\varphi_1}{i_1} - \varphi_1\right)} \right], \quad (17)$$

де  $\omega_0 = \frac{v_0 \operatorname{tg}\theta}{L_0}$  - кутова швидкість повороту автомобіля-тягача;  $L_0$  - база автомобіля-тягача;  $\theta$  - середній кут повороту керованих коліс автобуса;  $L_1$  - база причепа;  $c_0$  - відстань від характерної точки автомобіля-тягача до точки зіпнки з напівприцепом;  $R_0 = \frac{L_0}{\operatorname{tg}\gamma_0}$  - миттєвий центр повороту

автомобіля-тягача;  $\alpha_0 = \operatorname{arctg} \frac{c_0}{R_0}$  - кут, що визначає положення точки зіпнки автомобіля-тягача і напівпричепа;  $i_1$  - 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 і 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  $\theta$  визначається як

$$\varphi_1 = \frac{(L_1 + c)i_1}{L_0} \times \left\{ \theta - L_1 i_1 k_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\theta}{L_1 i_1 k_1}\right) \right] \right\}, \quad (18)$$

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 напівпричепу – по перехідній траєкторії.

Рівняння руху характерної точки тягача при його русі 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

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

а також

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

де  $a = \frac{R}{L}$ .

Після визначення допоміжних змінних  $u$  і  $v$  в рівняння для визначення координат характерної точки напівпричепи запишуться у вигляді

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

де

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

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

$$\varphi_1 = \varphi_1(\tau_1) \exp\left(-\frac{R_0\beta}{L_1 i_1}\right) + \frac{(L_1 + c)i_1}{L_0} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{R_0\beta}{L_1 i_1}\right) - \theta' \right\}. \quad (25)$$

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 рівним нулю. Кут складання у цій фазі визначиться як

$$\varphi_1 = \varphi_1(\tau_2) \exp\left(-\frac{\theta' - \theta}{L_1 i_1 k_2}\right) + \frac{(L_1 + c)i_1}{L_0} \times \left\{ \theta + L_1 i_1 k_2 \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\theta' - \theta}{L_1 i_1 k_2}\right) \right] - (\theta' - \theta) \right\}, \quad (26)$$

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:

$$\dot{X} = -R \quad (27)$$

$$\dot{Y} = 0.$$

У результаті інтегрування системи рівнянь (27) отримаємо

$$X_2 = -L \left[ a - \left( t - \frac{\pi}{2} \right) + \cos\left( 2 \arctg \frac{1}{z_n} e^{a\left( t - \frac{\pi}{2} \right)} \right) \right], \quad (28)$$

$$Y_2 = L \left[ a - \sin\left( 2 \arctg \frac{1}{z_n} e^{a\left( t - \frac{\pi}{2} \right)} \right) \right].$$

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

$$\varphi_1 = \varphi_1(\tau_3) \exp\left(-\frac{S}{L_1 i_1}\right). \quad (29)$$

Отримані рівняння для координат характерних точок автомобіля-тягача і напівпричепа, кута складання автопоїзда дозволяють при відомому передаточному відношенні 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 у якості прикладу наведені траєкторії руху ланок автопоїзда, тягач якого має передню і задню керовану вісь (схема №1). Ці траєкторії побудовані з використанням програмного забезпечення компанії Scania. Аналогічні траєкторії отримані і для усіх інших схем автопоїзда-контейнеровоза, а саме з некерованою третьою віссю тягача і керованим напівприцепом за постійного передаточного відношення приводу управління (схема №2), з некерованою третьою віссю тягача і некерованим напівприцепом (схема №3).

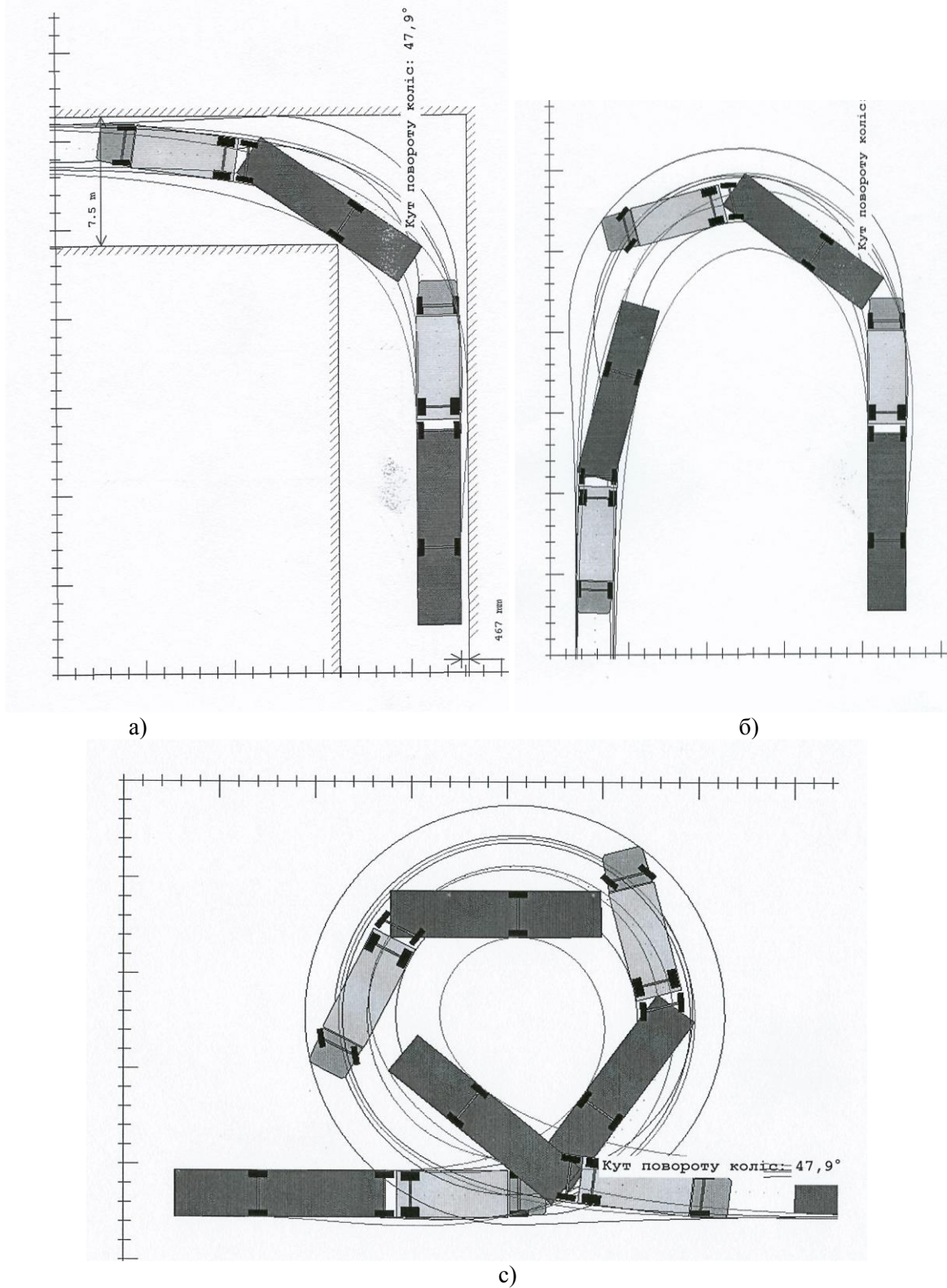


Рис. 2. Траєкторії руху автопоїзда з керованими передньою і задньою віссю автомобіля-тягача за різних типів повороту

У табл. 1 представлені габаритні радіуси повороту  $R_{вг}$  і  $R_{зг}$  та габаритна смуга руху  $B_r$  у мм при повороті автопоїзда на  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  і  $360^\circ$  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  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  і  $360^\circ$ .

Таблиця 1

До визначення показників маневреності автопоїзда-контейнеровоза

Схема автопоїзда	Поворот автопоїзда								
	90°			180°			360°		
	R <sub>вг</sub>	R <sub>зг</sub>	B <sub>г</sub>	R <sub>вг</sub>	R <sub>зг</sub>	B <sub>г</sub>	R <sub>зг</sub>	R <sub>зг</sub>	B <sub>г</sub>
№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 компоувальні 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°.

1. Сахно В.П. До визначення конструктивних і компоувальних 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 L67/47-49.
3. Трехзвенные автопоезда /Я.Е.Фаробин, А.М.Якобашвили, А.М.Иванов и др. Под общ. ред. Я.Е.Фаробина – Машиностроение, 1993. – 224 с.: ил.
4. Закин Я.Х. Маневренность автомобиля и автопоезда /Я.Х.Закин //М. Транспорт, 1986. – 137 с.
1. 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.
5. 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.
6. Енглезі О.А. Дослідження кінематики повороту автопоїзда на фізичній моделі / О.А.Енглезі // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К.: НТУ – 2007. – Вип. 5.