

УДК 629.113

В.П.Сахно, В.П.Онищук, В.М.Придюк
 Національний транспортний університет
 Луцький національний технічний університет

ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ МАНЕВРНОСТІ ТРИЛАНКОВИХ АВТОПОЇЗДІВ

Розглянуті методики визначення траєкторій ланок триланкового сидельно-причіпного автопоїзда за керованих причіпних ланок з прямим приводом управління на їх передні осі. Показано, що за керованого напівпричепа і причепа триланковий автопоїзд задовольняє вимогам директиви ЄС щодо маневреності.

Ключові слова: маневреність, автопоїзд, показник.

Вступ. Україна, ставши на шлях інтеграції в європейську та світову економічні системи, впроваджує в життя Програму створення і функціонування національної мережі міжнародних транспортних коридорів. Завдяки географічному положенню України через її територію проходять чотири із дев'яти транс'європейських транспортних коридорів, в яких велика частка вантажів буде перевозитися багатоланковими автомобільними поїздами [1]. Використання таких автопоїздів повинно бути підтверджено не тільки прогресивним транспортним законодавством, але і вирішенням певних технічних проблем, спрямованих на забезпечення високої продуктивності автопоїздів і всього транспортного потоку. Основними з таких проблем є необхідність забезпечення максимальної відповідності автопоїзда конкретним умовам експлуатації, можливості формування автопоїздів великої вантажопідйомності з наявного рухомого складу без суттєвої зміни його конструкції [2]. Можливості використання таких автопоїздів обмежені також необхідністю вирішення низки проблем, пов'язаних з безпекою їх руху і перш за все із забезпеченням маневреності і стійкості руху. Питання маневреності таких автопоїздів залежать від типу та складу причіпних ланок, які можуть бути як некерованими, так і керованими. Для некерованих автопоїздів визначення показників маневреності як аналітичними, так і графо-аналітичними методами не визиває утруднень [2], чого не можна сказати про автопоїзди з керованими причіпними ланками. Тому **метою роботи** є визначення показників маневреності триланкових автопоїздів з керованими причіпними ланками.

Основна частина. При визначенні показників маневреності досить розглянути рух автопоїзда на жорстких у бічному напрямку колесах. При цьому координати траєкторії ведених ланок автопоїзда можна визначати за кутами складання. У роботі [3] отримані рівняння кутів складання триланкового сидельно-причіпного автопоїзда з керованими ланками, які за незмінної швидкості руху $v = \text{const}$ записані у вигляді:

$$\frac{d\gamma_1}{d\gamma_0} = \frac{\text{tg}(\gamma_0)}{K_I \cdot L_0} \cdot \left(1 - \frac{L_0}{\text{tg}(\gamma_0) \cdot \cos(\alpha_0)} \cdot \frac{\sin(\gamma_1 + \gamma_{K1} - \alpha_0)}{L_1 \cdot \cos(\gamma_{K1})} \right) \quad (1)$$

$$\frac{d\gamma_2}{d\gamma_0} = \frac{\sin(\gamma_1 + \gamma_{K1} - \alpha_0)}{K_I \cdot L_1 \cdot \cos(\gamma_{K1}) \cdot \cos(\alpha_0)} \cdot \left(1 - \frac{\cos(\gamma_{K1})}{\cos(\gamma_{K1} + \alpha_1)} \cdot \frac{L_1 \cdot \cos(\gamma_1 - \alpha_0)}{\sin(\gamma_1 + \gamma_{K1} - \alpha_0)} \cdot \frac{\sin(\gamma_2 - \gamma_{K1} + \gamma_{K2} - \alpha_1)}{L_2 \cdot \cos(\gamma_{K2})} \right) \quad (2)$$

де L_0 – база автомобіля-тягача; L_1 – база напівпричепа; L_2 – база причепа;

$\gamma_0, \gamma_{K1}, \gamma_{K2}, \gamma_1, \gamma_2$ – кути повороту керованих коліс тягача, напівпричепа і причепа та перший і другий кути складання; i_0, i_1 – передаточні відношення приводу управління колесами (осями) причепа і напівпричепа; α_0, α_1 – кути між променями, що проходять з миттєвого центру повороту через некеровану вісь тягача, напівпричепа, причепа і відповідними точками зчеплення ланок автопоїзда.

У конструкціях сучасних причепів і напівпричепів застосовують, як правило, прямий керуючий зв'язок. Тоді кути повороту керованих коліс ланок запишуться через відповідні передаточні відношення:

$$\gamma_{K1} = \frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1 \quad (3)$$

$$\gamma_{K2} = \frac{\gamma_2}{i_1} - \gamma_2 \quad (4)$$

З урахуванням (3) і (4) рівняння (1) і (2) записані у вигляді

$$\frac{d\gamma_1}{d\gamma_0} = \frac{tg(\gamma_0)}{K_I \cdot L_0} \cdot \left(1 - \frac{L_0}{tg(\gamma_0) \cdot \cos(\alpha_0)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \alpha_0\right)}{L_1 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1\right)} \right) \quad (5)$$

$$\frac{d\gamma_2}{d\gamma_0} = \frac{\sin\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \alpha_0\right)}{K_I \cdot L_1 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1\right) \cdot \cos(\alpha_0)} \cdot \left(1 - \frac{\cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1\right)}{\cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1 + \alpha_1\right)} \cdot \frac{L_1 \cdot \cos(\gamma_1 - \alpha_0)}{\sin\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \alpha_0\right)} \cdot \frac{\sin\left(-\frac{\gamma_1}{i_0} + \gamma_1 + \frac{\gamma_2}{i_1} - \alpha_1\right)}{L_2 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_2}{i_1} - \gamma_2\right)} \right) \quad (6)$$

У системі рівнянь (5) і (6) невідомими залишаються кути α_0 і α_1 . Після їх виключення система рівнянь (1) і (2) записана у вигляді:

$$\frac{d\gamma_1}{d\gamma_0} = \frac{tg(\gamma_0)}{K_I \cdot L_0} \cdot \left(1 - \frac{L_0}{tg(\gamma_0)} \cdot \frac{\left(\sin\left(\frac{\gamma_1}{i_0}\right) - \frac{C_0 \cdot tg(\gamma_0)}{L_0} \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0}\right) \right)}{L_1 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1\right)} \right) \quad (7)$$

$$\frac{d\gamma_2}{d\gamma_0} = \frac{\left(\sin\left(\frac{\gamma_1}{i_0}\right) - \frac{C_0 \cdot tg(\gamma_0)}{L_0} \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0}\right) \right)}{K_I \cdot L_1 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1\right)} \cdot \frac{\left(\cos(\gamma_1) + \frac{C_0 \cdot tg(\gamma_0)}{L_0} \cdot \sin(\gamma_1) \right) \cdot \sin\left(-\frac{\gamma_1}{i_0} + \gamma_1 + \frac{\gamma_2}{i_1} - \alpha_1\right)}{K_I \cdot \cos\left(\frac{\gamma_2}{i_1} - \gamma_2\right) \cdot L_2 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1 + \alpha_1\right)} \quad (8)$$

де кут α_1 визначається як

$$tg(\alpha_1) = \frac{C_1 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1\right)}{C_1 \cdot \sin\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1\right) + \frac{L_1 \cdot \left(\cos(\gamma_1) + \frac{C_0 \cdot tg(\gamma_0)}{L_0} \cdot \sin(\gamma_1) \right)}{\left(\sin\left(\frac{\gamma_1}{i_0}\right) - \frac{C_0 \cdot tg(\gamma_0)}{L_0} \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0}\right) \right)}} \quad (9)$$

З формул (7) і (8) 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 автопоїзд не може виконувати поворот з високою швидкістю, на практиці розходження між теоретичними і практичними значеннями лежать у допустимих межах.

Оскільки в загальному випадку під час виконання повороту автомобіль проходить чотири стадії (входження в поворот, рух по колу, вихід з повороту, прямолінійний рух до повернення всіх

параметрів початковий стан), то математичну модель, яку наведено у рівняннях (52), (53) 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 ϕ_K . Так, маючи таке співвідношення $d\gamma_0 = R_{0MIN} \cdot K_{\Pi} \cdot d\phi_K$, а також прийнявши до уваги, що $\gamma_0 = \text{const} = \gamma_{0MAX}$ маємо:

$$\frac{d\gamma_1}{d\phi_K} = \left(1 - R_{0MIN} \cdot \frac{\left(\sin\left(\frac{\gamma_1}{i_0}\right) - \frac{C_0}{R_{0MIN}} \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0}\right) \right)}{L_1 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1\right)} \right) \quad (10)$$

$$\frac{d\gamma_2}{d\phi_K} = \frac{\left(\sin\left(\frac{\gamma_1}{i_0}\right) - \frac{C_0}{R_{0MIN}} \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0}\right) \right) \cdot R_{0MIN}}{L_1 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1\right)} - \quad (11)$$

$$\frac{\left(\cos(\gamma_1) + \frac{C_0}{R_{0MIN}} \cdot \sin(\gamma_1) \right) \cdot R_{0MIN} \cdot \sin\left(-\frac{\gamma_1}{i_0} + \gamma_1 + \frac{\gamma_2}{i_1} - \alpha_1\right)}{L_2 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_2}{i_1} - \gamma_2\right) \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1 + \alpha_1\right)}$$

При виході з повороту застосовуються рівняння (7) і (8), але оскільки рульове колесо обертається у зворотному напрямку, то слід використовувати коефіцієнт K_{Π} зі знаком “-”.

Остання стадія – прямолінійний рух автомобіля-тягача до того часу, поки усі вихідні параметри не повернуться у вихідний стан. Так на цій стадії кути складання ланок автопоїзда вже не залежать від положення керуючих коліс, а лише від шляху, який проходить автомобіль-тягач, тоді $d\gamma_0 = K_{\Pi} \cdot dS_0$. А так як $\gamma_0 = 0$, то:

$$\frac{d\gamma_1}{dS_0} = - \frac{\sin\left(\frac{\gamma_1}{i_0}\right)}{L_1 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1\right)} \quad (12)$$

$$\frac{d\gamma_2}{dS_0} = \frac{\sin\left(\frac{\gamma_1}{i_0}\right)}{L_1 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1\right)} - \frac{\cos(\gamma_1)}{\cos\left(\frac{\gamma_1}{i_0} - \gamma_1 + \alpha_1\right)} \cdot \frac{\sin\left(-\frac{\gamma_1}{i_0} + \gamma_1 + \frac{\gamma_2}{i_1} - \alpha_1\right)}{L_2 \cdot \cos\left(\frac{\gamma_2}{i_1} - \gamma_2\right)} \quad (13)$$

За відомими кутами складання і повороту керованих коліс тягача, напівпричепа і причепа можна побудувати траєкторії руху кожної ланки, а відповідно визначити габаритну смугу руху автопоїзда за його колового руху.

При будь-якому іншому повороті використання наведеної вище методики визиває певні утруднення. Щоб уникнути їх був розроблений алгоритм керування причіпними ланками триланкового автопоїзда. Суть алгоритму полягала в наступному. Спочатку керований напівпричіп з системою прямого управління розбивався на дві кінематичні ланки: перша ланка другого роду – кістяк напівпричепа з передньою керованою віссю і друга – рама візка із задніми ходовими осями. Поворот керованої осі разом і відносно кістяка (поздовжньої осі ланки другого роду) здійснюється при складанні обох ланок. Задаючим (керуючим) параметром є перший кут складання автопоїзда.

Розглянемо методику визначення координат першої кінематичної ланки, що реалізує прямий керуючий зв'язок на передню вісь возика напівпричепа. Будемо вважати заданими координати точок траєкторії тягача, як функції швидкості руху автопоїзда і передаточного відношення приводу керування передньою віссю напівпричепа, тобто $O_i(u_i, v_i)$. Необхідно визначити координати траєкторії першої кінематичної ланки – передньої осі напівпричепа, що віддалена від точки зчипки з тягачем на відстань L , тобто точки $A_i(x_i, y_i)$, рис. 1.

У початковий момент руху координати тягача $O_0(0, -L)$. Перемістимо тягач із положення O_{i-1} в положення O_i . Нахил дотичної до траєкторії тягача у точці O_i визначиться залежністю

$$y'_i = \frac{\frac{v_i - v_{i-1}}{u_i - u_{i-1}}(u_{i+1} - u_i) + \frac{v_{i+1} - v_i}{u_{i+1} - u_i}(u_i - u_{i-1})}{u_{i+1} - u_i} \quad (14)$$

Тангенс кута нахилу променя або кутовий коефіцієнт прямої $A_{i-1}O_i$ визначиться як

$$k_{1i} = \frac{v_i - y_{i-1}}{u_i - u_{i-1}} \quad (15)$$

Тангенс кута нахилу променя або кутовий коефіцієнт прямої $A_{i-1}O_{i-1}$ визначиться як

$$k_{2i} = \frac{v_{i-1} - y_{i-1}}{u_{i-1} - \delta_{i-1}} \quad (16)$$

Кут між променем $A_{i-1}O_i$ і дотичною до траєкторії тягача визначиться як

$$\alpha = \arctg \frac{k_{2i} - k_{1i}}{1 + k_{1i}y_i} \quad (17)$$

Кут між променем $A_{i-1}O_i$ і променем $A_{i-1}O_{i-1}$ визначиться як

$$\beta = \arctg \frac{k_{2i} - k_{1i}}{1 + k_{1i}k_{2i}} \quad (18)$$

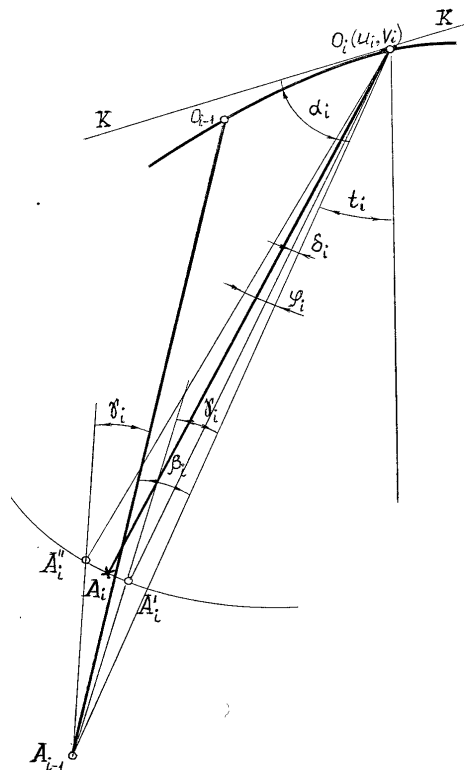


Рис.1. До визначення координат траєкторії першої кінематичної ланки – передньої керованої осі возика напівпричепа

Кут повороту передньої осі напівпричепа, що реалізує прямий керуючий зв'язок визначиться як

$$\gamma = \frac{\alpha}{u_{i\delta}} \quad (19)$$

Повернемо промені $A_{i-1}O_i$ і $A_{i-1}O_{i-1}$ на один і той же кут проти годинникової стрілки. При цьому «повернуті» промені перетнуть коло радіуса L з центром у точці $O_i(u_i, v_i)$, на якому повинна знаходитися передня вісь возика напівпричепи після переміщення тягача O_i , у точках A_i' і A_i'' .

Позначимо кути

$$\begin{aligned}\angle A_{i-1}O_iA_i' &= \delta \\ \angle A_{i-1}O_iA_i'' &= \phi.\end{aligned}\quad (20)$$

Знайдемо довжину відрізка $A_{i-1}O_i$, позначеного як

$$d_i = \sqrt{(u_i - x_{i-1})^2 + (v_i - y_{i-1})^2} \quad (21)$$

Із $\Delta A_{i-1}O_iA_i'$ за теоремою синусів отримаємо

$$\frac{\sin(180^\circ - \gamma_i - \delta_i)}{d_i} = \frac{\sin \gamma_i}{L} \quad (22)$$

або

$$\sin(\gamma_i + \delta_i) = \frac{d_i}{L} \sin \gamma_i \quad (23)$$

Звідки

$$\delta_i = \arcsin\left(\frac{d_i}{L} \sin \gamma_i\right) - \gamma_i \quad (24)$$

Аналогічно з $\Delta A_{i-1}O_iA_i''$ отримаємо

$$\phi_i = \arcsin\left[\frac{d_i}{L} \sin(\beta_i + \gamma_i)\right] - (\beta_i + \gamma_i) \quad (25)$$

Визначимо положення точки A_i як середнє між точками A_i' і A_i'' . При цьому кут $\Delta A_iO_iA_{i-1}$ визначиться як

$$\angle A_iO_iA_{i-1} = \frac{\phi_i - \delta_i}{2} + \delta_i = \frac{\phi_i + \delta_i}{2} = \Delta_i \quad (26)$$

Положення будь-якої точки на колі радіуса L з центром у т. O_i визначиться за виразами

$$\begin{cases} x_i = u_i - L \sin t_i, \\ y_i = v_i - L \cos t_i, \end{cases} \quad (27)$$

де t_i – кут, що відкладається від осі u .

Зокрема, для променя $A_{i-1}O_i$

$$t_i = \operatorname{arctg} \frac{1}{k_{1i}} \quad (28)$$

або $t_i = \operatorname{arccotg} k_{1i}$, або $t_i = \arcsin \frac{u_i - x_{i-1}}{d_i}$.

Для променя A_iO_i цей параметр збільшиться на величину $\frac{\phi_i + \delta_i}{2}$.

Якщо прийняти у (14) $t_i' = t_i + \frac{\phi_i + \delta_i}{2}$, то отримаємо координати т. A_i .

У розглянутому алгоритмі допущена неточність, обумовлена тією обставиною, що значення першого кута складання α_i на кожному кроці визначається дотичною до траєкторії тягача і променем $A_{i-1}O_i$, а не променем A_iO_i , положення якого залишається невідомим у момент визначення координат точки A_i .

Якщо за нове значення кута складання α_i прийняти кут між променем A_iO_i і дотичною $k-k$, то не важко замітити, що «нове» значення α_i дорівнює «старому» значенню, зменшеному на величину $(\phi_i + \delta_i)/2$, тобто

$$\alpha^{k+1} = \alpha^k - \frac{\phi_i + \delta_i}{2}, \tag{29}$$

де k – номер наближення.

«Нові» значення $\alpha_s = \alpha^{k+1}$ підставляємо у рівняння (6) і повторюємо весь алгоритм, за виключенням (8). Корекція проводиться до тих пір, доки відстань між точками A_i^k і A_i^{k+1} не стане меншою величини ε , що дорівнює

$$\varepsilon \leq \sqrt{(x_i^{k+1} - x_i^k)^2 + (y_i^{k+1} - y_i^k)^2} \tag{30}$$

Скоректовані таким чином значення координат x_i^{k+1} і y_i^{k+1} приймаються за істинні для точки A_i .

Положення кістяка напівпричепа з неповоротними осями і його точки B (другої кінематичної ланки) знаходиться у такій послідовності. Будемо вважати, що у початковий момент руху координати т. $A_0(0, -L)$ і т. $B_0[0; - (L+l_T)]$. Нехай тягач перемістився у т. $A_i(x_i, y_i)$. При цьому т. B_i розташується на дузі кола, що проведене радіусом l_T із т. $A_i(x_i, y_i)$, на рівній відстані від променів $B_{i-1}A_i$ і B_iA_i , рис. 2. Положення цих променів визначається кутами $\Delta A_i \hat{A}_{i-1} A_{i-1}$ і $\Delta A_i \hat{A}_i A_{i-1}$, що позначені як m_i і p_i .

$$m_i = \arctg \frac{x_i - x_{B_{i-1}}}{y_i - y_{B_{i-1}}} \tag{31}$$

Кутові коефіцієнти прямих $B_{i-1}A_i$ і B_iA_i відповідно рівні

$$k_{n1i} = \frac{x_{i-1} - x_{B_{i-1}}}{y_{i-1} - y_{B_{i-1}}} \tag{32}$$

$$k_{n2i} = \frac{x_i - x_{B_{i-1}}}{y_i - y_{B_{i-1}}} \tag{33}$$

Кут між цими прямими

$$\gamma_{A_i} = \arctg \frac{k_{n1i} - k_{n2i}}{1 + k_{n1i} \times k_{n2i}} \tag{34}$$

Допоміжний кут ϕ_{ni} визначиться як

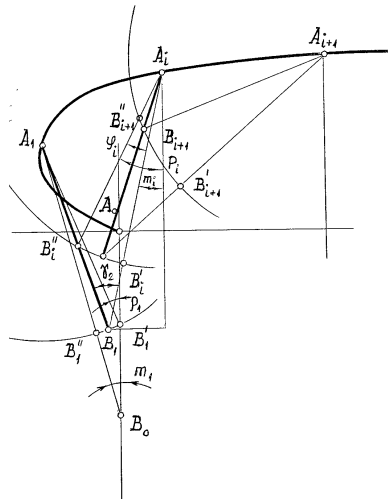


Рис.2. До визначення координат траєкторії другої кінематичної ланки – кістяка напівпричепа з неповоротними осями

$$\phi_{ni} = \arcsin \left(\frac{d_{2i}}{l_T} \sin \gamma_{B_i} \right) - \gamma_{B_i}, \tag{35}$$

де d_{2i} – відстань між точками $B_{i-1}A_i$,

$$d_{2i} = \sqrt{(x_i - x_{B_{i-1}})^2 + (y_i - y_{B_{i-1}})^2}. \tag{36}$$

Тоді

$$p_i = m_i + \phi_{ni}$$

Координати точок \hat{A}_i' і \hat{A}_i'' можна записати у вигляді

$$\begin{aligned}x_{B'i} &= x_i - l_T \sin m_i, \\y_{B'i} &= y_i - l_T \cos m_i\end{aligned}\quad (38)$$

$$\begin{aligned}x_{B''i} &= x_i - l_T \sin \rho_i, \\y_{B''i} &= y_i - l_T \cos \rho_i\end{aligned}\quad (39)$$

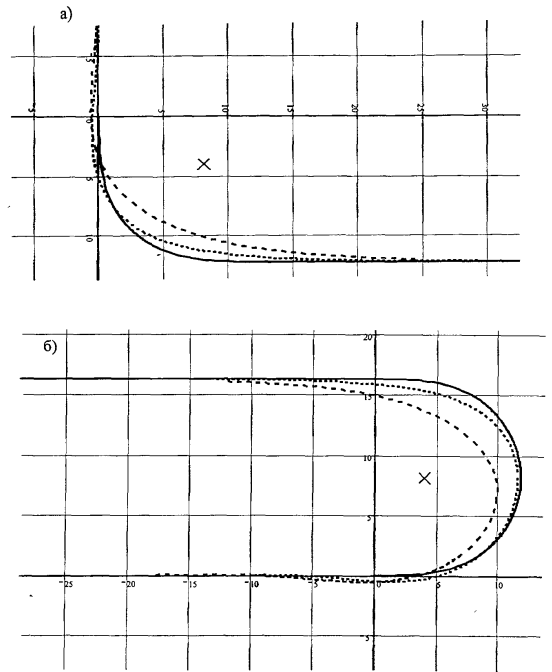
Тоді координати точки B_i визначаються як

$$\begin{aligned}x_{Bi} &= \frac{x_{B'i} + x_{B''i}}{2}, \\y_{Bi} &= \frac{y_{B'i} + y_{B''i}}{2}\end{aligned}\quad (40)$$

Даний алгоритм був реалізований в програмі розрахунку на ПК координат точок A_i і B_i , що визначають собою положення першого напівпричепа при виконанні поворотів на 90° і 180° , рис.3. Як слідує з наведеного рисунка, траєкторія кістяка напівпричепа з передньою керованою віссю на вході в поворот зміщується від центру повороту, зменшуючи тим самим відхилення між траєкторіями тягача і напівпричепа. Проте визначальним при цьому є зміщення траєкторії рами візка із задніми ходовими осями щодо траєкторії тягача, яке і визначає собою габаритну смугу руху автопоїзда.

За розглянутою методикою була визначена і траєкторія другої причіпної ланки – причепа з рознесеними осями, а потім побудована габаритна смуга руху автопоїзда, рис. 4. Як слідує з наведеного рисунка, за керованого напівпричепа і причепа триланковий автопоїзд задовольняє вимогам директиви ЄС щодо маневреності.

Висновки. Розглянуті методики визначення траєкторій ланок триланкового сідельно-причіпного автопоїзда за керованих причіпних ланок з прямим приводом управління на їх передні осі. Показано, що за керованого напівпричепа і причепа триланковий автопоїзд задовольняє вимогам директиви ЄС щодо маневреності.



_____ траєкторія тягача, ----- траєкторія рами візка із задніми ходовими осями,
..... траєкторія кістяка напівпричепа з передньою керованою віссю

Рис. 3. Траєкторії руху ланок автопоїзда при його повороті на 90° і 180°

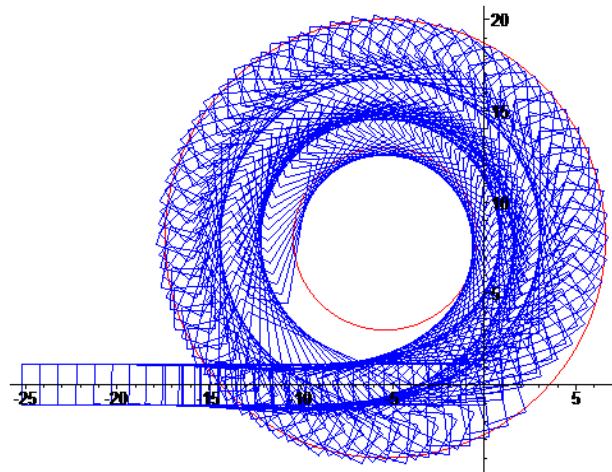


Рис. 4. Габаритна смуга руху триланкового сідельно-причіпного автопоїзда з причепом з рознесеними осями

1. Редзюк А.М., Новикова А.М., Мироненко В.П. Програма розвитку національної мережі міжнародних транспортних коридорів//Автошляховик України. Окремий випуск. Вісник ПНЦ ТАУ. – 2005. Випуск №8. - С.8-12.
2. Трехзвенные автопоезда /Я.Е.Фаробин, А.М.Якобашвили, А.М.Иванов и др. Под общ. ред. Я.Е.Фаробина – Машиностроение, 1993. – 224 с.: ил.
3. Сахно В.П., Вороніна І.Ф., Угляниця С.С., Стельмащук В.В. Маневреність триланкових автопоїздів// Автошляховик України. Окремий випуск. Вісник ЦНЦ ТАУ. –2004. Окремий випуск №7. С.118-124