

УДК 629.113

В.П.Сахно, П.О.Гуменюк, Р.М.Марчук

Національний транспортний університет

ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНО ПРИПУСТИМОЇ БАЗИ УНІВЕРСАЛЬНОГО НАПІВПРИЧЕПА-КОНТЕЙНЕРОВОЗА ПРИ УПРАВЛІННІ НАПІВПРИЧЕПОМ ШЛЯХОМ ГАЛЬМУВАННЯ КОЛІС ОДНОГО БОРТУ

У статті визначені радіуси повороту напівпричепа за різних значень гальмівного моменту на колесах одного борту. Показано, що збільшення гальмівного моменту на колесах одного борту возика на вході в поворот збільшує його радіус повороту до початку ковзання коліс, а потім залишається незмінним. Встановлено мінімально допустиме значення гальмівного моменту, за якого автопоїзд буде вписуватися у нормовану смугу руху.

Постановка проблеми. Відомо, що контейнерні перевезення – одні із найбільш зручних і економічних видів доставки вантажів, що виконуються як за локальної, так і міжнародної організації перевезень. Зважаючи на те, що вантажні перевезення контейнерів вирізняються високим рівнем безпеки і простотою митного оформлення, вони широко розповсюджені у всьому світі і об'єми їх перевезень зростають із року в рік.

Сучасний стан розвитку рухомого складу автомобільного транспорту для перевезень контейнерів характеризується різноманіттям типів і видів автомобілів, причепів і напівпричепів, проте більш раціональними є перевезення контейнерів універсальними напівпричепами. Так, фірма Fliegl випускає широку гаму контейнеровозів, серед яких є універсальні для транспортування усіх типів контейнерів, у тому числі і цистерн-контейнерів, розмірністю від 20 до 45 футів і контейнерів типу HQ.

Для універсальних контейнеровозів при перевезеннях 45-футових контейнерів необхідно подовжувати автопоїзд, а це погіршує вписуваність його в поворот. Збільшення габаритної смуги руху (ГСР) створює небезпеку для зустрічного транспорту, утрудняє проїзд у міських умовах і знижує середню швидкість руху усього транспортного потоку. Поліпшення вписуваності автопоїзда в поворот можливе за рахунок керованих (самоустановлювальних) осей (колiс) напівпричепа або управління напівпричепом шляхом гальмування колiс одного борту.

У роботі [1] визначені показники маневреності автопоїзда з універсальним напівпричепом-контейнеровозом із самоустановлювальною віссю напівпричепа. Зокрема, показано, що автопоїзд із самоустановлювальною віссю задовольняє вимогам Directive 2002/7/EC [2] щодо маневреності, проте його стійкість недостатня. **Метою роботи** є визначення показників маневреності автопоїзда при управлінні універсальним напівпричепом-контейнеровозом шляхом гальмування колiс одного борту його возика.

Матеріали і результати досліджень. У разі гальмування колiс одного борту максимально припустиму базу універсального напівпричепа-контейнеровоза можна шукати за тією ж методикою, що і для некерованого напівпричепа [3]. Бічні сили, що виникають при повороті автопоїзда, можуть бути визначені через коефіцієнти опору відведення k_{yi} і кути відведення δ_i .

Запишемо рівняння рівноваги усіх моментів, що діють на напівпричеп, відносно точки А, рис.1. Отримаємо:

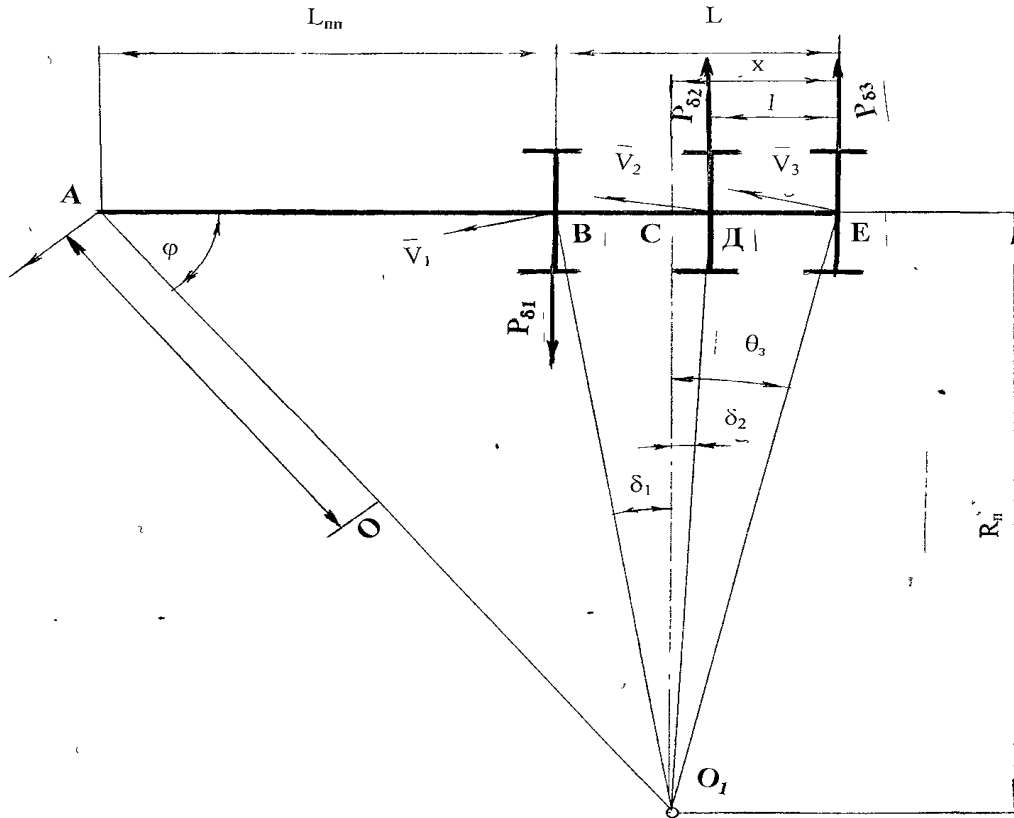


Рис.1.Розрахункова схема напівпричепа при управлінні шляхом гальмування коліс одного борту

$$-P_{\delta 1B} L_{np} + P_{\delta 2B} (L_{np} + L - l) + P_{\delta 3B} (L_{np} + L) - P_{\delta 13} L_{np} + P_{\delta 23} (L_{np} + L - l) + P_{\delta 33} (L_{np} + L) - M_2 = 0. \quad (1)$$

Виразимо бічні сили через коефіцієнти опору відведення і кути відведення внутрішнього і зовнішнього коліс кожної осі напівпричепа. Отримаємо:

$$\begin{aligned} & -k_{\delta 1B} \times \frac{L-x}{R+0,5B} L_n + k_{\delta 2B} \times \frac{x-l}{R+0,5B} (L_n + L - l) + k_{\delta 3B} \times \frac{x}{R+0,5B} (L_n + L) - \\ & -k_{\delta 13} \times \frac{L-x}{R-0,5B} L_n + k_{\delta 23} \times \frac{x-l}{R-0,5B} (L_n + L - l) + k_{\delta 33} \times \frac{x}{R-0,5B} (L_n + L) - M_2 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Рівняння (2) після нескладних перетворень приводиться до вигляду:

$$xL_n n_1 + x n_2 (L_n + L - l) + x n_3 (L_n + L) - a_r b_r M_r - L \times L_n n_1 - l n_2 (L + L_n - l) = 0 \quad (3)$$

У рівнянні (3) прийняті такі позначення:

$$\begin{aligned} a_r &= R + 0,5B; \quad b_r = R - 0,5B; \quad n_1 = 0,5R(k_{\delta 1B} + k_{\delta 13}) + B(k_{\delta 13} - k_{\delta 1B}); \\ n_2 &= 0,5R(k_{\delta 2B} + k_{\delta 23}) + B(k_{\delta 23} - k_{\delta 2B}); \quad n_3 = 0,5R(k_{\delta 3B} + k_{\delta 33}) + B(k_{\delta 33} - k_{\delta 3B}). \end{aligned}$$

Позначимо далі

$$L_n + L - l = c, \quad L_n + L = d.$$

З урахуванням прийнятих позначень рівняння (3) запишеться у вигляді:

$$xL_n n_1 + x n_2 c + x n_3 d - a_r b_r M_r - L_n L n_1 - l c n_2 = 0. \quad (4)$$

Запишемо рівняння проєкцій усіх сил на поздовжню вісь возика напівпричепа у прийнятих позначеннях. Отримаємо:

$$xn_1 + xn_2 + xn_3 - Ln_1 - lcn_2 = 0 \quad (5)$$

Із рівняння (5) визначимо зміщення полюса повороту. Отримаємо:

$$x = \frac{Ln_1 + ln_2}{n_1 + n_2 + n_3}. \quad (6)$$

Підставимо зміщення полюса повороту x у рівняння (4). Після нескладних перетворень отримаємо:

$$\left(\frac{Ln_1 + ln_2}{n_1 + n_2 + n_3} \right) (L_n n_1 + cn_2 + dn_3) - [(0,5R)^2 - B^2] M_\Gamma - L_n Ln_1 - lcn_2 = 0 \quad (7)$$

Позначимо:

$$k_{\delta 1B} + k_{\delta 13} = k_1, \quad k_{\delta 1B} - k_{\delta 13} = k_{11}; \quad k_{\delta 2B} + k_{\delta 23} = k_2, \quad k_{\delta 2B} - k_{\delta 23} = k_{21} \\ k_{\delta 3B} + k_{\delta 33} = k_3, \quad k_{\delta 3B} - k_{\delta 33} = k_{31}. \quad (8)$$

Тоді

$$n_1 = Rk_1 + 0,5 Bk_{11}, \quad n_2 = Rk_2 + 0,5 Bk_{21}, \quad n_3 = Rk_3 + 0,5 Bk_{31}. \quad (9)$$

З урахуванням прийнятих позначень (8) і (9) рівняння (7) приводиться до вигляду:

$$n_1 n_2 (Lc + lL_n - L_n L - lc) + n_1 n_3 (Ld - L_n L) + n_2 n_3 (ld - lc) - 0,25 R^2 (n_1 + n_2 + n_3) + B^2 (n_1 + n_2 + n_3) = 0, \quad (10)$$

яке після ряду перетворень записано у вигляді

$$R^3 M_\Gamma \Sigma k_i - R^2 (a_{11} k_1 k_2 + a_{12} k_1 k_3 + a_{13} k_2 k_3 + M_\Gamma 0,5 B \Sigma k_{ij}) - R \{ 0,5 B [(a_{11} (k_1 k_{21} + k_2 k_{21}) + (a_{12} (k_1 k_{31} + k_3 k_{11})) + (a_{13} (k_2 k_{31} + k_3 k_{21})) - 0,5 B \Sigma k_{ij}] \} - (0,5 B)^2 (a_{11} k_1 k_{21} + a_{12} k_1 k_{31} + a_{13} k_2 k_{31}) - (0,5 B)^3 \Sigma k_{ij} = 0, \quad (11)$$

де $a_{11} = Lc + lL_{nn} - LL_{nn} - lc$, $a_{12} = Ld - LL_{nn}$, $a_{13} = ld - lc$

Отримане кубічне рівняння (11) можна привести до вигляду:

$$R^3 + aR^2 + bR + c = 0 \quad \text{або} \quad x^3 + ax^2 + bx + c = 0, \quad (12)$$

де $x = R$,

$$a = \frac{a_{11} k_1 k_2 + a_{12} k_1 k_3 + a_{13} k_2 k_3 - M_\Gamma 0,5 B \Sigma k_{ij}}{M_\Gamma \Sigma k_i},$$

$$b = \frac{0,5 B [(a_{11} (k_1 k_{21} + k_2 k_{21}) + (a_{12} (k_1 k_{31} + k_3 k_{11})) + (a_{13} (k_2 k_{31} + k_3 k_{21})) + 0,5 M_\Gamma B \Sigma k_{ij}]}{M_\Gamma \Sigma k_i}$$

$$c = \frac{(0,5 B)^2 (a_{11} k_{11} k_{21} + a_{12} k_{11} k_{31} + a_{13} k_{21} k_{31}) - M_\Gamma \Sigma k_{ij}}{M_\Gamma \Sigma k_i} \quad (13)$$

Для визначення радіуса повороту напівпричепа при управлінні шляхом гальмування коліс одного борту возика необхідно визначити нормальні реакції опорної поверхні на колеса одного борту возика і коефіцієнти опору відведення внутрішнього і зовнішнього коліс, які є функціями як нормального навантаження, так і гальмівного моменту, що діє на колесо або борт возика.

Для визначення перерозподілу вертикальних навантажень на колеса ланок возика напівпричепа розглянемо рух автопоїзда на повороті.

Відцентрову силу, що діє на возик напівпричепа і його вісь, можна записати у вигляді:

$$P_{Bn} = m_n \frac{v^2}{R}, \quad P_{jyi} = \frac{m_{ni} v^2}{R} \quad (14)$$

де m_n – маса, що припадає на возик напівпричепа;

v – швидкість руху автопоїзда;

R – радіус повороту возика напівпричепа.

m_{ni} – маса, що припадає на окрему вісь возика.

Нормальні реакції опорної поверхні, що діють на внутрішні і зовнішні колеса возика напівпричепа записані у вигляді:

$$Z_6 = \frac{a_n}{2L_{mn}} G_1 - \frac{h_{g1}}{2L_{mn}} P_{jx} - \frac{h_{g1}}{2B} P_{Bn}; \quad Z_3 = \frac{a_n}{4L_{mn}} G_1 - \frac{h_{g1}}{2L_{mn}} P_{jxi} + \frac{h_{g1}}{2B} P_{Bn}, \quad (15)$$

де a_n – відстань від точки зчипки напівпричепа з тягачем до центра мас напівпричепа;

h_{g1} – висота центра мас напівпричепа;

G_1 – сила тяжіння від повної маси напівпричепа;

P_{jlx} – сила інерції напівпричепа.

Розрахунок нормальних реакцій опорної поверхні на колеса осей возика напівпричепа виконаємо за таких вихідних даних:

– маса-брутто 45-футового контейнера – 33000 кг;

– маса, що припадає на возик напівпричепа - $m_n=25530$ кг;

– маса, що припадає на возик напівпричепа, рівномірно розподіляється по його осям;

– сила тяжіння від повної маси напівпричепа - $G_{возик}=250449$ Н;

– сила тяжіння від повної маси напівпричепа на його осі $G_1=G_2=G_3=8348,3$ Н;

– відстань від центра мас напівпричепа до точки зчипки – $a_n=6000$ мм;

– висота центра мас напівпричепа - $h_{g1}=1930$ мм;

– колія напівпричепа $B=2030$ мм;

– швидкість руху автопоїзда - $v=3.5$ м/с;

– рух автопоїзда – усталений, $P_{jlx}=0$;

– мінімально припустимий радіус повороту некерованого напівпричепа $[R_{n\min}] = 8,21$ м [3].

За таких вихідних даних відцентрова сила і нормальні реакції опорної поверхні, що діють на внутрішні і зовнішні колеса возика напівпричепа, склали

$$P_{Bn} = \frac{m_n \times v^2}{R} = 35349 \text{ Н},$$

$$Z_6 = \frac{a_n}{2L_{mn}} G_n - \frac{h_{g1}}{4L_{mn}} P_{jx} - \frac{h_{g1}}{B} P_{Bn} = 91617 \text{ Н} \quad Z_3 = \frac{a_n}{2L_{mn}} G_n - \frac{h_{g1}}{4L_{mn}} P_{jxi} + \frac{h_{g1}}{2B} P_{Bn} = 158832 \text{ Н}$$

За такої суттєвої зміни реакцій по бортам возика напівпричепа необхідно враховувати зміну коефіцієнта опору відведення коліс його осей від нормального навантаження на колесо. Для цього скористаємося залежністю Д.А. Антонова [4] для визначення бічної реакції на колесах осей возика напівпричепа, яка записується у вигляді:

$$Y = qk_{yoz} \delta, \quad (16)$$

де $q = q_N q_T q_\varphi q_\gamma q_{\approx} q_{2p} q_{3y} q_{ny}$,

де k_{yoz} – екстремальне значення коефіцієнта k_{yo} в залежності від нормальної реакції в контактні колеса з опорною поверхнею;

q_N - коефіцієнт впливу на відведення перерозподілу нормальних опорних реакцій; q_T - коефіцієнт впливу тягових і гальмівних сил; q_γ - коефіцієнт кута нахилу площини колеса до опорної поверхні; $q_{ш}$ - коефіцієнт тиску повітря в шині; $q_{\Sigma y}$ - коефіцієнт відведення задніх керованих коліс; $q_{ну}$ - коефіцієнт несталого відведення; q_ϕ - коефіцієнт урахування якості дорожнього покриття; q_{\approx} - коефіцієнт урахування коливань колеса виникаючих при русі по нерівній поверхні; q_{zp} - у випадку руху колеса по ґрунтовій дорозі.

За умови експлуатації автопоїзда по дорогах із твердим покриттям і при номінальному тиску повітря в шині можна прийняти:

$$q_{\approx} = q_{zp} = q_{\Sigma y} = q_{ну} = q_\gamma = q_{ш} = q_\phi = 1$$

Тоді одержимо:

$$Y = q_N q_T k_{yoz} \delta \quad (17)$$

Коефіцієнти, що входять у вираз (17), визначаються залежностями:

- для вертикального навантаження

$$q_N = 1 - 0,6 \left(\frac{\Delta R_{Z\partial}}{R_{Z\partial}} \right)^2 + 0,4 \left(\frac{\Delta R_{Z\partial}}{R_{Z\partial}} \right)^3 - 0,1 \left(\frac{\Delta R_{Z\partial}}{R_{Z\partial}} \right) - 0,1 \left(\frac{\Delta R_{Z\partial}}{R_{Z\partial}} \right)^2 \operatorname{sgn} \frac{\Delta R_{Z\partial}}{R_{Z\partial}},$$

де

$$\Delta R_{Z\partial} = R_Z - R_{Z\partial},$$

R_Z – нормальна реакція опорної поверхні на колеса возика напівпричепи;

$R_{Z\partial}$ – нормальна реакція опорної поверхні, що відповідає екстремальному значенню коефіцієнта опору бічному відведенню;

Нормальна реакція опорної поверхні, що відповідає екстремальному значенню коефіцієнта опору бічному відведенню визначається як [4]

$$R_{Z\partial} = R_{Zном} - 0,0726 \left(\frac{HD}{B} \right)^2 \left(\frac{d}{B} \right)^2 \left(\frac{n_{cl} + 8}{n_{cl}} \right) H (D^2 - d^2)^2 \times \left[3,75 R_{Zном} + 15 - 1000 \left(\frac{n_{cl}}{n_{cl} + 10} \right) DB^2 \sqrt{\frac{B}{H}} \right], \quad (18)$$

де $R_{Zном}$ – нормальна реакція опорної поверхні, що відповідає номінальному тиску повітря в шині 385/65R22.5, що встановлена на напівпричепі фірми Fliegl, за каталогом фірми-виробника, $R_{Zном} = 45000 \text{ Н}$;

H – висота профілю шини, $H = 0,25 \text{ м}$;

D, d – зовнішній і внутрішній діаметри шини, $D = 1,072 \text{ м}$, $d = 0,571 \text{ м}$;

B – ширина профілю шини, $B = 0,375 \text{ м}$;

n_{cl} – кількість шарів корду шини, $n_{cl} = 10$.

Для цих шин нормальна реакція опорної поверхні, що відповідає екстремальному значенню коефіцієнта опору бічному відведенню, склала

$$R_{Z\partial} = 43838 \text{ Н}$$

і коефіцієнт, що визначає вплив вертикального навантаження на опір відведенню:

- для шин коліс зовнішнього борту

$$q_{N_3} = 0,995;$$

- для шин коліс внутрішнього борту

$$q_{N_B} = 0,997.$$

Коефіцієнт впливу гальмівних сил на коефіцієнт опору бічному відведенню коліс борту возика визначається залежністю [4]:

$$q_T = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{R_x}{\varphi R_z}\right)^2}}{1 + 0,375 \frac{R_x}{R_z}}$$

де R_x – гальмівна сила на колесах борту возика напівпричепи.

Позначимо $\frac{R_x}{R_z} = \gamma$ - питома гальмівна сила

На рис.2 наведена залежність коефіцієнта впливу гальмівних сил на коефіцієнт опору бічному відведенню коліс борту возика.

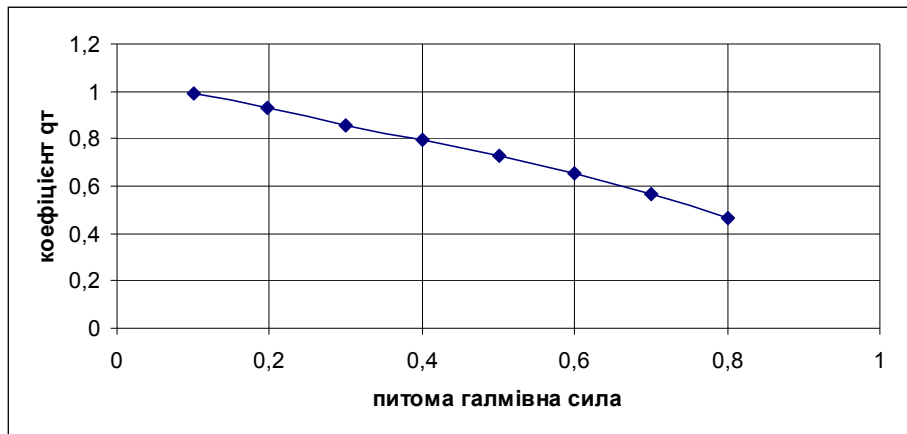


Рис.2 .Залежність коефіцієнта впливу гальмівних сил на коефіцієнт опору бічному відведенню від питомої гальмівної сили

Як слідує з рис. 2, питома гальмівна сила суттєво впливає на коефіцієнт опору бічному відведенню. Якщо прийняти, що бічна сила, яка діє на вісь возика напівпричепи, однакова для зовнішнього і внутрішнього коліс, то кут відведення зовнішнього колеса будь-якої осі буде значно більшим за кут відведення внутрішнього колеса, тобто при гальмуванні коліс одного борту возика радіус повороту напівпричепи буде збільшуватися, а габаритна смуга руху зменшуватися.

Визначимо кути відведення коліс зовнішнього і внутрішнього борту возика напівпричепи. Екстремальний коефіцієнт $k_{y_{03}}$ опору бічному відведенню визначається залежністю:

$$k_{y_{03}} = 1000 \left(\frac{n_{cl}}{n_{cl} + 10} \right) DB^2 \sqrt{\frac{B}{H}} + \frac{6,2}{d^3 (n_{cl} + 8)} \left[\frac{DHB}{(D^2 - d^2)d} \right] p_{ш}$$

де $p_{ш}$ – тиск повітря в шині, $p_{ш}=800$ кПа

Для шин 385/65R22.5 величина екстремального коефіцієнта опору бічному відведенню склала $k_{y_{03}}= 132$ кН/рад.

Бічна сила, що діє на колеса однієї осі возика напівпричепи

$$P_{yi} = \frac{P_{Bn}}{3} = 11783H$$

У свою чергу $P_{yi} = Y_i = k_T \times k_N \times k_{y_{03}} \times \delta$

З урахуванням корегуючих коефіцієнтів k_T , k_N і екстремального коефіцієнта опору бічному відведенню $k_{y_{03}}$ кут відведення внутрішнього колеса возика напівпричепи склав $\delta_{вн}=0,0696$ рад ($3,984^\circ$). Для зовнішнього колеса кут відведення буде визначатися величиною гальмівного моменту, що діє на колесо однієї осі. За питомої гальмівної сили у межах $\gamma=0,4$ кут відведення зовнішнього колеса возика напівпричепи складе $\delta_{зн}=0,0956$ рад ($5,482^\circ$) і відповідно коефіцієнти опору бічному відведенню внутрішнього і зовнішнього колеса визначаються як

$$k_{\delta_{вн}} = 84648 \text{ Н/рад (1477,3 Н/град)}, \quad k_{\delta_{зн}} = 61267 \text{ Н/рад (1069,2 Н/град)}$$

За цих вихідних даних коефіцієнти кубічного полінома, що визначає радіус повороту напівпричепа склали:

$$a = -9,75; \quad b = -3,76; \quad c = -0,54,$$

а радіус повороту

$$R_n = 10,126 \text{ м.}$$

За аналогічною методикою були розраховані радіуси повороту напівпричепа і за інших значень гальмівного моменту, рис. 3. З наведеного рис.3 слідує, що збільшення гальмівного моменту на колесах одного борту возика на вході в поворот збільшує його радіус повороту до початку ковзання коліс, а потім залишається незмінним. Тому доцільним є визначення мінімально допустимого значення гальмівного моменту, за якого автопоїзд буде вписуватися у нормовану смугу руху. Для цього необхідно виконання умови $R_n \geq [R_{n \text{ min}}]$, тобто радіус повороту повинен бути $R_n \geq 8,21$ м. Цьому радіусу відповідає гальмівний момент M_r в межах до 10 кНм, що може бути забезпечено шляхом гальмування коліс однієї осі.

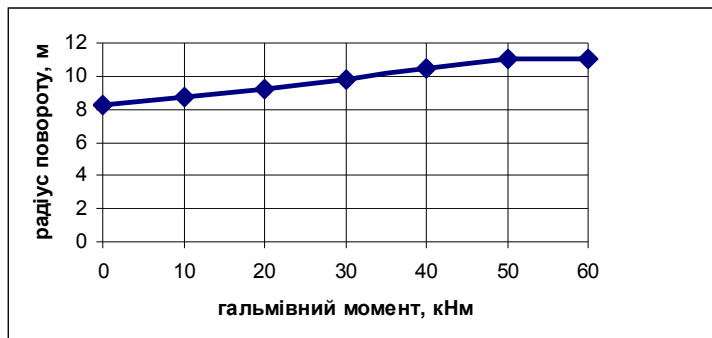


Рис.3 . Залежність радіусу повороту напівпричепа від гальмівного моменту на колесах одного борту возика

Висновки. Визначені радіуси повороту напівпричепа за різних значень гальмівного моменту на колесах одного борту. Показано, що збільшення гальмівного моменту на колесах одного борту возика на вході в поворот збільшує його радіус повороту до початку ковзання коліс, а потім залишається незмінним. Встановлено мінімально допустиме значення гальмівного моменту, за якого автопоїзд буде вписуватися у нормовану смугу руху.

1. Сахно В.П. К определению показателей маневренности автопоезда с самоустанавливающейся осью полуприцепа /В.П.Сахно, В.Б.Боднарук, Е.А. Крестьянполь //Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів. Збірник наукових праць. - Київ, УТУ, ТАСУ, 1998 - с.45-50.
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. Крышень Н.И. Дополнительный критерий оценки максимально допустимой базы двухосного полуприцепа /Н.И.Крышень //Автомобильная промышленность.- 1978. - №6. - С. 23-24
4. Антонов Д.А. Расчет устойчивости движения многоосных автомобилей /Д.А. Антонов // М.: Машиностроение, 1984. - 164 с.