

1985. – 304 с. 3. Гуськов В.В. Тракторы: теория / Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. и др.; под общ. ред. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1988. – 377 с. 4. www.michelinag.com. 5. UN/ECE Regulation No.106.

**Bibliography (transliterated):** 1. Biderman, V. L., et al. *Avtomobil'nye shiny (konstrukcija, raschet, ispytaniya, ekspluatacija)*. Moscow: Goshimizdat, 1963. Print. 2. Ksenevich, I. P., V. A. Skotnikov and M. I. Ljasko. *Hodovaja sistema – pochva – urozhaj*. Moscow: Agropromizdat, 1985. Print. 3. Gus'kov, V. V., et al. *Traktory: teorija*. Ed. V. V. Gus'kov. Moscow: Mashinostroenie, 1988. Print. 4. Michelin Agricultural Tires. Change site. Web. 08 March 2015 <<http://www.michelinag.com>>. 5. UN/ECE Agreement. Addendum 105:Regulation No. 106. 16 April 2009. Web. 09 March 2015 <<http://www.unece.org>>.

*Поступила (received) 11.03.2015*

УДК 629.113

**В.В. РЕДЧИЦ**, канд. техн. наук, проф. КУЕИТУ, Кременчуг;  
**Б.И. КАЛЬЧЕНКО**, д-р. техн. наук, проф. КУЕИТУ, Кременчуг;  
**Е.В. ГОЛОВИНА**, доц. КУЕИТУ, Кременчуг

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ ДВУХЗВЕННОГО АВТОПОЕЗДА ПРИ МАНЕВРЕ «ПОВОРОТ» НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

На базе доработанной математической модели криволинейного движения одиночного автомобиля предложен новый метод расчета параметров криволинейного движения двухзвеного автопоезда при маневре «поворот» с учетом времени запаздывания реакции автомобиля на управляющее воздействие, но без учета углов увода. Предложенный способ построения траектории движения двухзвеного автопоезда позволяет в первом приближении проводить имитацию маневра «поворот  $R_n = 35$  м» на жестких колесах и давать предварительную оценку управляемости и устойчивости транспортного средства на стадии проектирования. Метод в дальнейшем планирует использовать при исследовании динамики маневра «поворот».

**Ключевые слова:** кривизна траектории, угол складывания, время запаздывания, вход в поворот, управляемость, устойчивость.

**Введение.** Для сокращения сроков создания и доводки опытных образцов новых автопоездов конструктору необходимо еще на стадии проектирования провести оценку основных показателей управляемости и устойчивости в соответствии с нормативными документами.

Одним из таких показателей является нормативная максимальная скорость (42 км/ч), при которой автопоезд категории  $N3$  вписывается в габаритный коридор разметки участка маневра «поворот  $R_n = 35$  м».

**Анализ публикаций.** Анализ опубликованных работ за последние годы показывает, что все исследования по управляемости и устойчивости одиночных автомобилей и двух и трехзвеновых автопоездов связаны с траекторией

движения, как кинематической, так и с учетом качения на эластичных шинах. Этому вопросу уделено много внимания в работах Я.Х. Закина, В.П. Сахно, Д.А. Антонова, М.А. Подрыгалю, В.П. Волкова, Г.А. Смирнова, В.М. Полякова, В.А. Горелова, А.Г. Болдырева и др.

Авторам статьи неизвестны работы по определению параметров криволинейного движения двухзвенных автопоездов при маневре «поворот  $R_n = 35$  м» на стадии проектирования.

**Постановка задачи.** Целью данного исследования является определение параметров траектории и максимальной скорости выполнения маневра «поворот  $R_n = 35$  м» двухзвенным автопоездом на стадии проектирования.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать метод построения расчетной траектории движения двухзвенных автопоездов без учета углов увода при маневре «поворот»;
- усовершенствовать математическую модель одиночного автомобиля для двухзвенного автопоезда;
- подтвердить адекватность математической модели при испытании автопоезда 10×10 КрАЗ-6010 при маневре «поворот».

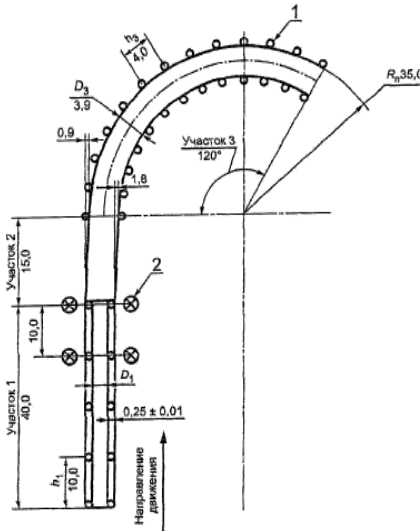


Рис. 1 – Разметка участка для маневра «поворот  $R_n = 35$  м»: 1 – вертикальные

ограничители разметки коридоров движения на участках 1, 2 и 3; 2 – датчики измерения скорости;  $h_1$  – шаг установки вертикальных ограничителей на участке 1;  $h_3$  – шаг установки вертикальных ограничителей на участке 3;  $D_1$  – ширина коридора на участке 1;  $D_3$  – ширина коридора на участке 3. Точность разметки ширины коридора  $D_1 \dots \pm 0,1$  м. Точность разметки ширины коридора  $D_3 \dots \pm 0,05$  м.

**Математическая модель.** Для контроля параметров расчетных траекторий, вначале построим траекторию автопоезда на жестких колесах, то есть без учета внешних сил и моментов, но с учетом времени запаздывания  $t_3$ .

Для седельных автопоездов категории  $N3$  полной массой 20 т, максимальная скорость маневра не должна быть меньше 42 км/ч.

Разметка участка для маневра «поворот  $R_n = 35$  м» для транспортных средств категории  $N3$  с габаритной шириной больше 2,5 м представлена на рис. 1.

В соответствии с разметкой участка все условия для совершения маневра заданы. Остается определить

физические возможности водителя в системе «водитель – автомобиль – дорога», то есть указать вначале ту угловую скорость поворота управляемых колес (УК) и рулевого колеса (РК), при которой автопоезд должен вписаться в

габаритный коридор участка с заданной скоростью движения.

Радиус  $R_n = 35$  м – это значение наружного радиуса разметки, а средний радиус коридора входа в правый поворот определяется по формуле (рис. 1):

$$\rho_k = R_n - \frac{D_3}{2} = 35 - \frac{3,9}{2} = 33,05 \text{ м.} \quad (1)$$

Нами принято условие, что положение педали подачи топлива при входе в поворот остается неизменным [1], то есть  $V_A = const$ .

Длина участка, на котором полуприцеп автопоезда должен вписаться в коридор  $R_n = 35$  м, составляет

$$S_n = S_2 + L - V_A \cdot t_3, \quad (2)$$

где  $S_2$  – длина второго участка (рис. 1);  $L = 7,5$  м – база полуприцепа;  $V = 42$  км/ч – заданная начальная скорость автопоезда;  $t_3$  – время запаздывания реакции автомобиля на поворот ПК, секунд [1];

$$t_3 = (a_i + 2 \cdot V_A(\Delta t)) / V_A, \quad (3)$$

$a_i$  – длина продольной оси контактного отпечатка УК, м;  $\Delta t$  – время, в течение которого рассматривается неустановившийся процесс поворота.

Время входа в поворот до  $\rho_k = 33,05$  м определяется равенством:

$$t_n = S_n / V_A. \quad (4)$$

Количество положений звеньев автопоезда (точки  $A, A_n$ ) для построения траектории определяется по формуле:  $K = t_n / (\Delta t)$ .

Для того чтобы автопоезд на пути  $S_n$  вписался в габаритный коридор (рис. 2) должно быть выполнено условие:

$$\rho_{C1}^* = (C_1 A_n) = L_n / \operatorname{tg} \psi = 33,05 \text{ м.} \quad (5)$$

Из условия (5) имеем:

$$\operatorname{tg} \psi = L_n / 33,05. \quad (6)$$

$$\psi = \operatorname{arctg}(L_n / 33,05). \quad (7)$$

Угол  $\psi$  – это тот максимальный угол складывания, при котором автопоезд впишется в габаритный коридор маневра «поворот», определяемый из начальных условий маневра.

При входе в поворот угол складывания  $\psi_i^*$  зависит от скорости движения и радиуса кривизны траектории точки  $A$  тягача и определяется (8):

$$\psi_i^* = \sum_1^i (\Delta \psi_i); \Delta \psi_i = V_A(\Delta t) / \rho_{Ti}. \quad (8)$$

Радиус кривизны траектории тягача  $\rho_{Ti}$  описывается формулой:

$$\rho_{Ti} = \frac{L}{\operatorname{tg}(\alpha_g \cdot t_i)} + \frac{B}{2}. \quad (9)$$

где  $L$  – база тягача;  $B$  – колея;  $t_i$  – текущее время.

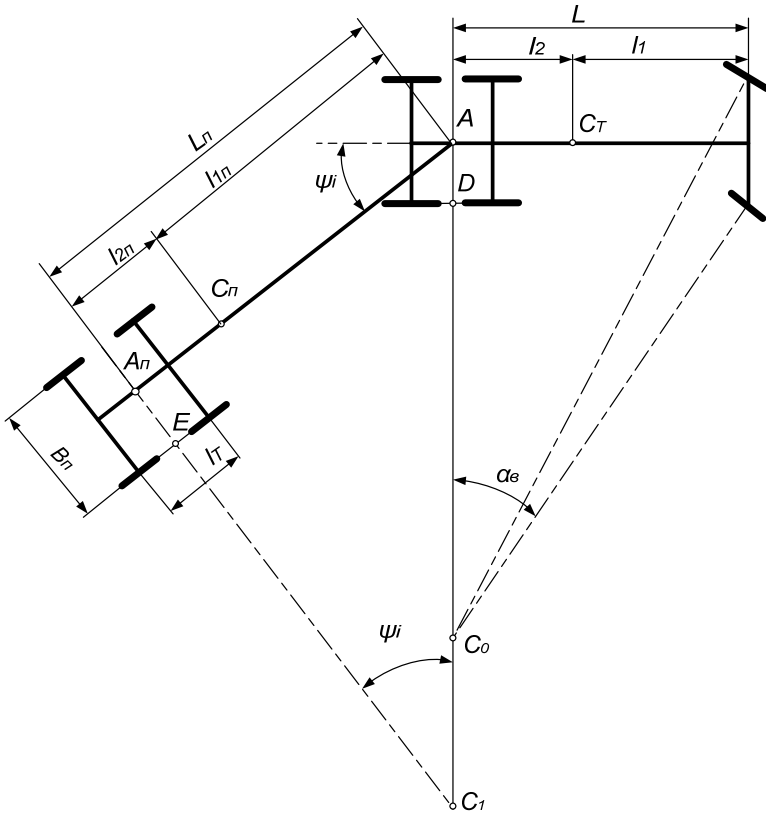


Рис. 2 – Расчетная схема входа в поворот двухзвенного автопоезда.

Из (8) и (9) следует, что для определения угла складывания  $\psi_i^*$  при движении по криволинейной траектории необходимо определить угловую скорость внутреннего (относительно центра поворота) УК, а следовательно, и угловую скоростью поворота рулевого колеса.

Угловая скорость поворота внутреннего управляемого колеса определяется так:

$$\dot{\alpha}_g = (\omega_{pk} \cdot U_{Tp}) / i_{pm} \quad (10)$$

где  $U_{Tp} = var$  – передаточное число рулевой трапеции, так как правый поворот;  $i_{pm}$  – передаточное число рулевого механизма.

Для первого приближения принимаем  $\dot{\alpha}_g = const$ .

Учтём физическую возможность водителя обеспечить значение угловой скорости рулевого колеса в пределах  $\omega_{pk} = 7 \dots 9$  рад/с, [3].

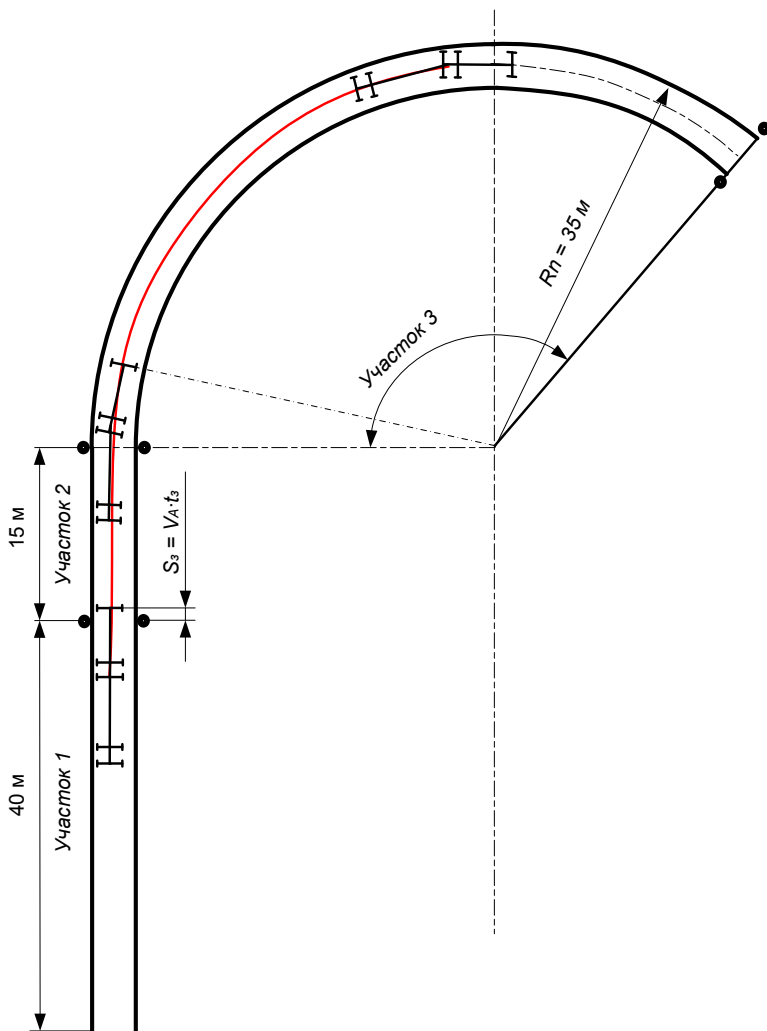


Рис. 3 – Траектория движения автопоезда КрАЗ-6010 при выполнении маневра «поворот  $R_n = 35$  м»

Вписываемость автопоезда будет обеспечена при:

$$\psi = \psi_i^* . \quad (11)$$

Условие  $\psi \leq \psi_i^*$  будет указывать на то, что угловую скорость рулевого колеса  $\omega_{pk}$  необходимо увеличить, а при условии  $\psi \geq \psi_i^*$  – уменьшить.

Средняя угловая скорость поворота внутреннего УК определяется из условия маневра, зависимость (9), при  $\rho_{Ti} = \rho_k = 33,05$  м и  $t_i = t_n = S_n / V_A$ :

$$\dot{\alpha}_6 = \frac{\arctg(L_{II}/(\rho_k - 0,5B))}{t_n}. \quad (12)$$

Определив необходимые исходные данные по (1) – (12), можно рассчитать кинематические радиусы тягача и полуприцепа, при этом проверяя выполнение условия (11).

Траектория автопоезда строится по расчетным радиусам  $\rho_{Ci} = (C_1 A)$ ,  $\rho_{Ti} = (C_0 A)$ ,  $\rho_{Ci}^* = (C_1 A_n)$  методом, предложенным в [1], [2].

**Пример расчёта.** На рис. 3 представлена траектория маневра «поворот  $R_n = 35$  м», выполненная автопоездом КрАЗ-6010 с такими техническими характеристиками: база тягача –  $L = 5,3$  м; колея тягача –  $B = 2,16$  м; полная масса тягача –  $m = 20071$  кг; база полуприцепа –  $L_{II} = 7,5$  м; база тележки –  $l_T = 1,4$  м; масса полуприцепа –  $m_{II} = 23547$  кг; нагрузка на переднюю ось тягача –  $R_{z(1-2)} = 56650$  Н; нагрузка на тележку тягача –  $R_{z(3-6)} = 144060$  Н; нагрузка на тележку полуприцепа –  $R_{zII} = 144060$  Н; положение центра масс тягача –  $l_1 = 3,76$  м,  $l_2 = 1,54$  м; по высоте –  $h_z = 1,19$  м; положение центра масс полуприцепа –  $l_{1II} = 4,59$  м,  $l_{2II} = 2,91$  м; по высоте полуприцепа –  $h_{zII} = 1,85$  м.

**Выводы.** Предложенный метод построения траекторий двухзвенного автопоезда позволяет в первом приближении проводить имитацию манёвра «поворот  $R_n = 35$  м» на жестких колесах.

Доработанная математическая модель движения одиночного автомобиля позволяет определять параметры криволинейного движения автопоезда при манёвре «поворот  $R_n = 35$  м» на жестких колесах.

**Список литературы:** 1. Редчиц В.В., Головина Е.В., Кораблёв А.Ф. Исследование управляемости трехосных автомобилей при маневре «переставка» // Нові технології. – 2011. – №4 (34). – С. 80 – 87. 2. Редчиц В.В., Головина Е.В., Редчиц С.В. Кинематика двухзвенного автопоезда при выполнении маневра «переставка» // Нові технології. – 2014. – № 3 – 4 (45 – 46). – с. 115 – 119. 3. Болдырев А.Г. Метод оценки энергетических затрат при функционировании всеколесного рулевого управления многоосных колесных машин на стадии проектирования : автореферат дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины» / А.Г. Болдырев – Москва, 2006. – 16 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Redchic, V. V., E. V. Golovina and A. F. Korabl'ov. "Issledovanie upravljajemosti trehosnyh avtomobilej pri manevre perestavka." *Novi tehnologii*. No. 4 (34). 2011. 80–87. Print. 2. Redchic, V. V., E. V. Golovina and S. V. Redchic. "Kinematika dvuhzvennogo avtopoezda pri vypolnenii manevra perestavka." *Novi tehnologii*. No. 3–4 (45–46). 2014. 115–119. Print. 3. Boldyrev, A. G. *Metod ocenki jenergeticheskikh zatrat pri funkcionirovanii vsekolosnogo rulevogo upravlenija mnogoosnyh kolesnyh mashin na stadii proektirovanija. Avtoref. dys. na zdobutija nauk. stupenja kand. tehn. nauk.* Moscow, 2006. Print.

Поступила (received) 10.03.2015