

# КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ ПОВОРОТЕ ТРАКТОРА

Г.С. ГОРИН, д.т.н.;

В.М. ГОЛОВАЧ, аспирант (БГАТУ)

Тракторы тяжелых тяговых классов обычно выполняют с шарнирно-сочлененной рамой, что позволяет на повороте работать с кинематически согласованным приводом передних и задних колес. Тракторы малых тяговых классов выполняют с передними управляемыми колесами. При этом, как правило, на повороте привод передних колес отключают. У новых тракторов «Беларус-1221», «Беларус-1522» и «Беларус-2522» тяжелых классов тяги 20...50кН управляемые -- передние колеса. Изучается возможность их привода на повороте путем включения ускоряющей передачи. В настоящей работе рассмотрено влияние параметров межосевого привода на показатели поворачиваемости.

В таблице приведены результаты анализа экспериментальных данных кинематики установившегося поворота трактора-установки. Эксперименты выполнены с изменением параметров кинематического несоответствия ( $k_v$  -- соотношения скоростей передних и задних колес) межосевого блокированного привода (МБП) и тягового усилия  $P_{кр}$ . Отдельные эксперименты выполнены с межосевым дифференциальным приводом (МДП). Для трактора, который движется без увода колес:

$$K_{RB34}^0 = \frac{R_3^0}{R_4^0} = \frac{tg\alpha_2}{tg\alpha_1}$$

$$K_{RB12}^0 = \frac{R_1^0}{R_2^0} = \frac{R_3^0}{R_4^0} * \frac{\cos\alpha_2}{\cos\alpha_1} = \frac{\sin\alpha_2}{\sin\alpha_1}$$

Если центр скоростей совпадает с геометрическим центром  $O_T$ , кинематическое соотношение радиусов поворота колес при

$\alpha_1 = 20^\circ$   $\alpha_2 = 24^\circ$  составляет (табл.):

- для передних колес  $K_{RB12}^0 = 1,19$ ;

- для задних колес  $K_{RB34}^0 = 1,22$ ;

- передних по отношению к задним

$K_{RLB} = 1,055$ .

В таблице применены следующие обозначения:

$\lambda_{II}$  -- доля нагрузки на передние колеса,

$R_1, R_2, R_3, R_4$  -- радиусы поворота колес соответственно переднего правого, переднего левого, заднего правого, заднего левого,

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  -- углы поворота колес с соответствующими индексами,

$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$  -- буксования колес с соответствующими индексами.

При  $P_{кр} = 0$  реальные и геометрические соотношения для колес составляют (табл.):

- передних  $\frac{K_{RB12}}{K_{RB12}^0} = 1,034...1,067$ ;

- задних  $\frac{K_{RB34}}{K_{RB34}^0} = 1,036...1,084$ ,

т.е. в обоих случаях забегают внешние колеса.

При  $P_{кр} > 0$ :

- если  $k_v = 1,05$

$\frac{K_{RB12}}{K_{RB12}^0} = 0,933$  -- наступает блокировка переднего МКД.

$\frac{K_{RB34}}{K_{RB34}^0} = 1,01$ , -- для заднего МКД.

т.е. «тормозится» переднее внешнее колесо, что приводит к появлению

**Кинематические соотношения, определяемые работой межколесного дифференциала (МКД) при повороте трактора установки**  
 $\lambda_{II} = 0,4, \alpha_1 = 20^\circ, \alpha_2 = 24^\circ, \alpha_3 = \alpha_4 = 0$

Показатели	$P_{кр} = 0$			$P_{кр} \neq 0$		
	МБП $K_v = 1,05$	МБП $K_v = 0,93$	МДП $K_v = 1,07$	МБП $K_v = 1,05$ $P_{кр} = 12кН$	МБП $K_v = 0,93$ $P_{кр} = 8кН$	МДП $K_v = 1,08$ $P_{кр} = 12,8кН$
Соотношения частот вращения колес						
$K_{RB12} = \frac{R_1}{R_2} * \frac{1-\delta_2}{1-\delta_1}$	1,23	1,24	1,27	1,11	1,20	1,23
$K_{RB34} = \frac{R_3}{R_4} * \frac{1-\delta_4}{1-\delta_3}$	1,3	1,26	1,32	1,24	1,23	1,29
Соотношение радиусов поворота						
$\frac{K_{RB12}^0}{K_{RB12}}$	1,034	1,042	1,067	0,933	1,0	1,03
$\frac{K_{RB34}^0}{K_{RB34}}$	1,066	1,36	1,084	1,013	1,0	1,05
Вывод				При МБП $K_{RB} = K_{RB}^0$ , кроме колес $i=1,2$ при $k_v=1,05$		
Углы увода с поворотом контактного отпечатка колеса						
$\varphi_k$	-9...10°	-3...4°	-1...4,5°	-17...20°	-3...5°	-4...6°

больших углов увода, связанных с поворотом контактного отпечатка колес  $\varphi_{ки} = 17...20^\circ$ .

- если  $\kappa_v = 0,93$

$$\frac{\kappa_{RB12}}{\kappa_{RB12}^0} \cdot \frac{\kappa_{RB34}}{\kappa_{RB34}^0} = 1,0,$$

углы увода  $\varphi_{ки} = -3...5^\circ$  при этом малы;

- если применён МДП  $\kappa_v = 1,07$ :

$$\frac{\kappa_{RB12}}{\kappa_{RB12}^0} = 1,03; \quad \frac{\kappa_{RB34}}{\kappa_{RB34}^0} = 1,05,$$

т.е. забегают внешние колеса. Суммарные углы  $\varphi_{\Sigma} = -4...8^\circ$  меньше, чем при МБП и  $\kappa_v = 1,05$ .

Уточнение известных положений теории поворота применительно к полноприводной ходовой системе сводится к учету углов увода, вызванных поворотом контактного отпечатка при срабатывании МКД. Последние связаны с  $\Delta \omega_{\Sigma}$  - приращением (замедлением) угловой скорости внутреннего колеса  $i=4$  по сравнению с теоретическим.

Названный угол увода

$$\varphi_K = \frac{\pm \Delta \omega_K}{\omega_4^0 \pm \Delta \omega_K}$$

Знаку (+) соответствует приращение скорости колеса  $i=4$  (при одновременном замедлении внешнего).

Знаку (-) замедление (при одновременном ускорении внешнего).

Тогда

$$\frac{\Delta \omega_{K34}}{\omega_4^0} = \frac{\varphi_K}{1 \mp \varphi_K}$$

Соотношение радиусов поворота при движении с поворотом контактного отпечатка

$$\kappa_{RB34} = \frac{R_4^0 \left( 1 \pm \frac{\Delta \omega_K}{\omega_{i,4}} \right) + B}{R_4^0 \left( 1 \pm \frac{\Delta \omega_K}{\omega_{i,4}} \right)} = 1 + \frac{B}{R_4^0 \left( 1 \mp \frac{\varphi_i}{1 - \varphi_i} \right)}$$

При  $\alpha_1 = 20^\circ$ ,  $\alpha_2 = 24^\circ$  и повороте без буксования колес трактора:

- если  $\varphi_{ки} = -20^\circ$  (0,35 рад) забегают внешние задние колёса

$\kappa_{RB} > \kappa_{RB}^0$  (рис. 1б),

$$\kappa_{RB34} = 1 + \frac{1,68}{6,4 \left( 1 - \frac{0,35}{1 + 0,35} \right)} = 1,35$$

- если забегают внутренние колеса  $\varphi_{ки} = +10^\circ$  (0,174 рад)  $\kappa_{RB} < \kappa_{RB}^0$  расчетное соотношение (рис. 1а):

$$\kappa_{RB34} = 1 + \frac{1,68}{6,4 \left( 1 + \frac{0,174}{1 - 0,174} \right)} = 1,22$$

Экспериментальные данные, следующие из таблицы адекватны расчетным:

-  $\kappa_{RB34} = 1,30...1,32$  для МБП  $\kappa_v = 1,05$  и МДП,  $P_{кр} = 0$ ;

-  $\kappa_{RB34} = 1,24...1,29$  для МБП и МДП  $P_{кр} > 0$ .

На рис. 1а представлена трактовка кинематики поворота при оставании передних и задних внешних колес одного борта (горизонтальная составляющая скорости  $\Delta V(-)$  по сравнению с поворотом вокруг центра  $O_1$ , соответственно скорость внутренних передних и задних колес увеличивается на  $\Delta V(+)$ . Вы-

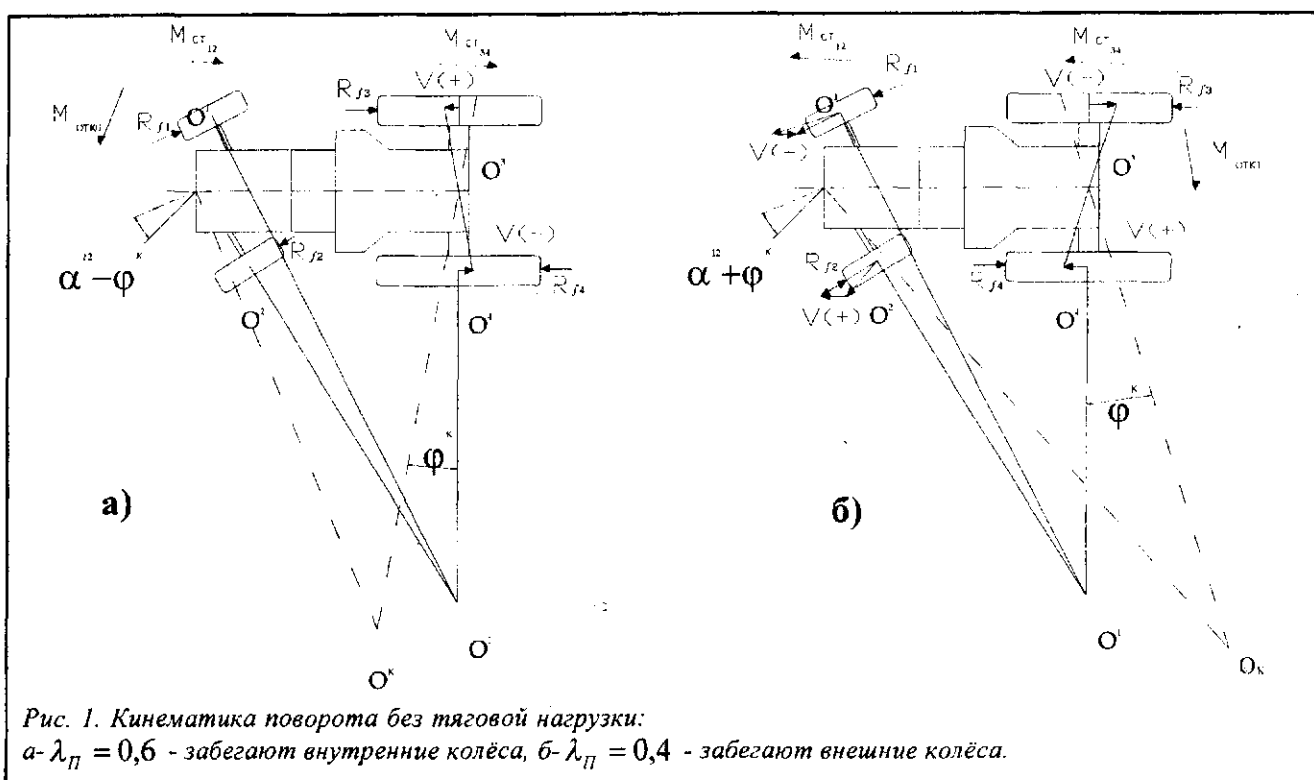


Рис. 1. Кинематика поворота без тяговой нагрузки:  
а-  $\lambda_{\Pi} = 0,6$  - забегают внутренние колёса, б-  $\lambda_{\Pi} = 0,4$  - забегают внешние колёса.

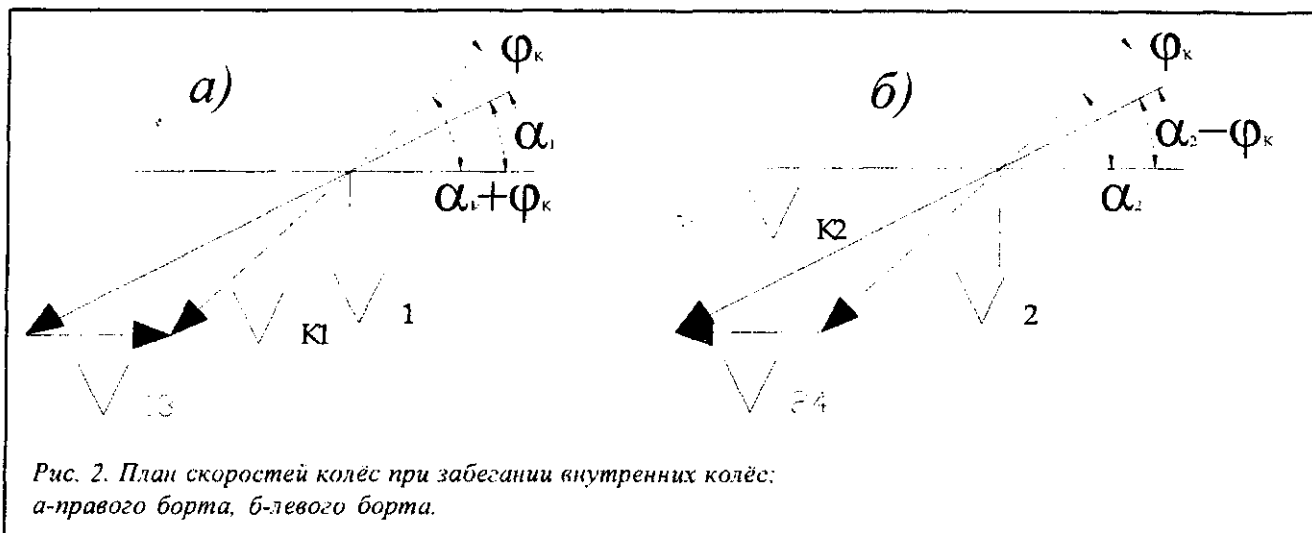


Рис. 2. План скоростей колёс при забегании внутренних колёс: а-правого борта, б-левого борта.

полним геометрическое сложение скоростей колёс

$$\bar{V}_{ip} = \bar{V}_i^0 + \Delta\bar{V}$$

Смысл дополнительных построений для нахождения угла увода  $\varphi_k$  задних колёс ясен из рис. 2а. Для нахождения кинематического центра поворота проведена линия  $O_{12}O_k$  из середины заднего моста под углом  $\varphi_k$  к вертикали.

Далее проведены штриховые линии, перпендикулярные векторам скоростей  $\bar{V}_{1p}$  и  $\bar{V}_{2p}$  передних колёс. Точка пересечения штриховых линий  $O_{34}O_k$  и  $O_{12}O_k$  - кинематический центр скоростей, расположенный внутри базы трактора. Такое расположение последнего свойственно переднеприводным автомобилям и полноприводным тракторам с большой нормальной нагрузкой на передние колёса ( $\lambda_{пг} = 0,6$ ). Названный перпендикуляр, проведенный из центра пятна контакта колеса  $i=1$  не проходит через центр  $O_k$ , а проходит через центр пятна контакта колеса  $i=4$ .

Эксперименты показывают, что на колесо  $i=1$  действует большая боковая сила и дополнительная тангенциальная реакция  $R_{f1}$ . Последняя и является причиной срабатывания переднего МКД.

Аналогичные построения выполнены на рис. 1б для схемы с забеганием внешних передних и задних колёс. Такая схема срабатывания МКД свойственна повороту трактора с тяговой нагрузкой под действием противоположного по знаку отклоняющего момента  $M_{откл}(-)$ . При этом кинематический центр поворота  $O_k$  находится за осью задних колёс на пересечении штриховых линий  $O_{34}O_k$ , проведенной под углом  $\varphi_k$  к вертикали, и  $O_{12}O_k$ , проведенной перпендикулярно вектору скорости  $V_{2p}$ . Аналогичный перпендикуляр, проведен-

ный через центр пятна контакта колеса,  $i=1$ , не проходит через центр  $O_k$ , а проходит через центр пятна контакта колеса  $i=2$ .

Таким образом, в результате поворота корпуса трактора по часовой стрелке под действием отклоняющего момента  $M_{откл}(-)$  колесо катится вокруг центров  $O_1$  и  $O_2$ , что приводит к образованию упора в виде ДТР  $R_{f1}$ . Особенность схемы поворота полноприводных тракторов с передними управляемыми колёсами заключается в том, что на переднее внешнее колесо  $i=1$  действуют большие ДТР  $R_{f1}$  и боковые силы.

На кинематических схемах поворота, представленных на рис. 1а, начальные положения ходовой системы показаны сплошными линиями, конечные - штриховыми.

Приращения продольных скоростей смещения колёс  $i=3$  и  $i=1$  при повороте рамы на угол  $+\varphi_k$  (рис. 2)

$$\nabla V_{13} = -\Delta\omega_k * r_k$$

Приращение аналогичных скоростей смещения колёс  $i=4$  и  $i=2$

$$\nabla V_{24} = \Delta\omega_k * r_k$$

Из условия неразрывности трактора

$$\nabla V_{13} = -\nabla V_{24}$$

На рис. 2 приведены планы скоростей для колёс правого и левого бортов при забегании внутренних колёс.

Проекция названных скоростей смещения на плоскости качения колёс  $i=1$  и  $i=2$  находятся по теореме синусов из  $\Delta ABC$

$$\frac{\Delta V_{13}}{\sin \varphi_k} = \frac{\Delta V_{k1}}{\sin(180^\circ - \alpha_1 - \varphi_k)} = \frac{\Delta V_{k1}}{\sin(\alpha_1 + \varphi_k)}$$

$$\frac{\Delta V_{24}}{\sin \varphi_k} = \frac{\Delta V_{k2}}{\sin(180^\circ - \alpha_2 + \varphi_k)} = \frac{\Delta V_{k1}}{\sin(\alpha_2 - \varphi_k)}$$

При  $\alpha_1 = 20^\circ$ ,  $\varphi_K = 10^\circ$ ,

$$\Delta V_{k1} = \frac{\Delta V_{13}}{0,174} * \sin 30^\circ = 2,87 * \Delta V_{13}.$$

Если  $\frac{\Delta \omega_{K34}}{\omega_{K4}} = 0,16 \dots 0,24$ , то при повороте по схеме

рис. 1а следует:  $\Delta \omega_{k12} = 2,87(0,16 \dots 0,24)\omega_k =$   
 $= 0,46 \dots 0,689\omega_k$ , т.е. частота вращения внутреннего колеса резко увеличивается, а наружного - уменьшается.

Экспериментальные данные адекватны расчетным:

- при  $P_{\text{сп}} = 0$   $\kappa_{RB12} = 1,03 \dots 1,27$  - внешние колеса забегают;

- при  $P_{\text{сп}} > 0$   $\kappa_{RB12} = -0,933 \dots 1,03$ .

Аналогичные построения произведены на рис. 3 для схемы с забеганием внешних колес.

Для колеса  $i=1$  из теоремы синусов получим

$$\frac{\Delta V_{13}}{\sin \varphi_K} = \frac{\Delta V_{k1}}{\sin(180^\circ - \alpha_1 + \varphi_K)}$$

$$\Delta V_{k1} = \frac{\Delta V_{13}}{\sin(\alpha_1 + \varphi_K)} \sin \varphi_K.$$

При  $\alpha_1 = 20^\circ$ ,  $\varphi_K = 10^\circ$

$$\Delta V_{k12} = \frac{\Delta V_{k13}}{\sin 30^\circ} * \sin 10^\circ = 0,35 \Delta V_{k1}.$$

Отсюда следует, что при движении по схеме 1а межколесный дифференциал переднего моста подвержен блокированию.

Соотношение для  $\kappa_{RB12}$  приобретает вид

$$\kappa_{RB12} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} * \left[ 1 + \frac{B}{R_1 + \left( \frac{\Delta \omega * \sin(\alpha_1 - \varphi_k)}{\omega_k * \sin \varphi_k} \right)} \right].$$

Если забегают внешние колеса

$$\frac{\Delta \omega}{\omega_{K4}} = 0,174 \text{ и } \varphi_K = 10^\circ,$$

$$\kappa_{RB12} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{\cos 24}{\cos 20} * \left[ 1 + \frac{1,68}{6,4 * (1 - 0,267 * \frac{\sin 10}{\sin 10})} \right] = 1,35.$$

Если  $\frac{\Delta \omega}{\omega_{K4}} = 0,174$  и  $\varphi_K = -10^\circ$ ,

$$\kappa_{RB12} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{\cos 24}{\cos 20} * \left[ 1 + \frac{1,68}{6,4 * (1 + 0,174 * \frac{\sin 30}{\sin 10})} \right] = 1,0725.$$

Экспериментальные данные адекватны расчетам:

- при  $P_{\text{сп}} = 0$   $\kappa_{RB12} = -1,03 \dots 1,27$  - внешние колеса забегают;

- при  $P_{\text{сп}} > 0$   $\kappa_{RB12} = -0,933 \dots 1,03$ .

Данный кинематический анализ произведен исходя из допущения о том, что происходит свободное т.е. заземленное обкатывание.

Результирующий угол  $\varphi_{K4}$  образуется в результате сложения углов увода - бокового и вызванного поворотом контактного отпечатка.

