

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-107159>

Оригинальное исследование



Моделирование движения и расчета составляющих боковых сил направляющих колес хлопкоуборочной машины

Б.М. Азимов, Ш.З. Ихсанова

Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта, Ташкент, Узбекистан

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Одной из актуальных задач является движение хлопкоуборочной машины (ХУМ) на поворотных полосах хлопкового поля по криволинейным траекториям. При этом качение колес ХУМ происходит с боковым уводом шин, вследствие чего машина может иметь не допустимые, по условиям сбора хлопка-сырца, отклонения в боковом направлении траектории движения при повороте для входа на грядки хлопкового поля, а тяговые показатели управляемых колес ХУМ существенно снижаются.

Цель работы — является построение математических моделей и проведение кинематических расчетов для определения параметров движения и значений боковых сил, коэффициентов сопротивления боковому уводу шин направляющих колес ХУМ необходимых для достижения требуемых эксплуатационных качеств и сохранения заданной точности траекторного движения по поворотной полосе хлопкового поля при приемлемых тяговых показателях.

Материалы и методы. Динамические процессы очень сложны, и их трудно проанализировать в полном объеме. В основе разработанных моделей лежат уравнения баланса и не рассматривается движение колес по отдельности с учетом прогибов шин.

Результаты. Рассмотрена кинематическая схема поворота ХУМ МХ-1.8 с передними ведущими и задними управляемыми колесами. Принято, что ХУМ МХ-1.8 движется с малой постоянной скоростью, когда центробежной силой можно пренебречь. Кроме того, боковой увод и есть тот самый параметр, который отражает воздействие на машину внешних силовых факторов, сопровождающих криволинейное движение.

Заключение. Анализируя полученные результаты, можно отметить следующее: при криволинейном движении ХУМ основными параметрами, определяющими поворот машины, являются база ХУМ, средний угол поворота управляемых колес и углы бокового увода задней оси. Причём, необходимо отметить, что углы бокового увода передней и задней оси ХУМ, их значение и изменение будут оказывать существенное влияние на кинематику поворота машины. Наличие бокового увода есть основная первопричина значительных отклонений от заданной траектории движения ХУМ на поворотной полосе хлопкового поля.

Ключевые слова: хлопкоуборочная машина; моделирование; прямолинейные и криволинейные движения; кинематика поворота; боковой увод.

Как цитировать:

Азимов Б.М., Ихсанова Ш.З. Моделирование движения и расчета составляющих боковых сил направляющих колес хлопкоуборочной машины // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 2. С. 107–115. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-107159>

Рукопись получена: 06.05.2022

Рукопись одобрена: 20.04.2023

Опубликована: 15.05.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-107159>

Original Study Article

Motion simulation and calculation of the components of the lateral forces of the guiding wheels of a cotton-harvesting machine

Bakhtiyor M. Azimov, Shahodat Z. Ikhsanova

Digital technologies and artificial intelligence development research institute, Tashkent, Uzbekistan

ABSTRACT

BACKGROUND: One of the relevant issues to study is the motion of a cotton-harvesting machine (CHM) at the turning lanes of the cotton field along curvilinear path. At the same time, the CHM's wheels rolling occurs with lateral slip of tires, so the machine may have unacceptable, according to the conditions for raw cotton harvesting, deviations in the lateral direction of the motion path when turning to enter the beds of the cotton field, and the traction performance of the CHM's steered wheels declines significantly.

AIMS: Building mathematical models and carrying out kinematic simulations to determine the motion parameters and the values of lateral forces, the side slip resistance coefficients of tires of the CHM's guide wheels necessary to achieve the required performance and to maintain the specified accuracy of the path motion along the headland of the cotton field with acceptable traction indicators.

METHODS: Dynamic processes are hugely complicated and difficult to analyze in full. The developed models are based on the balance equations and the wheels motion is not considered separately, taking into account tire deflections.

RESULTS: The kinematic scheme of turning of the MKh-1.8 CHM with front driving and rear steered wheels was considered. It was assumed that the MKh-1.8 CHM moves at a low constant velocity, so the centrifugal force can be neglected. In addition, lateral slip is the very parameter that reflects the impact of external force factors that go with the curvilinear motion on the machine.

CONCLUSIONS: Analyzing the obtained results, the following can be noted: during the curvilinear motion of the CHM, the main parameters that determine the turning of the machine are the CHM wheelbase, the average steering angle of the steered wheels and the slip angles of the rear axle. Moreover, it should be noted that the slip angles of the front and rear axles of the CHM, their values and change have a significant impact on the machine turning kinematics. The presence of lateral slip is the main reason of significant deviations from the given path of the CHM motion at a headland of a cotton field.

Keywords: cotton-harvesting machine; modeling; rectilinear and curvilinear motion; turning kinematics; lateral slip.

To cite this article:

Azimov BM, Ikhsanova ShZ. Motion simulation and calculation of the components of the lateral forces of the guiding wheels of a cotton-harvesting machine. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(2):107–115. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-107159>

Received: 06.05.2022

Accepted: 20.04.2023

Published: 15.05.2023

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач современной инженерной практики является моделирование движения ХУМ при поворотных полосах хлопкового поля по криволинейным траекториям. Такое движение обусловлено внешними воздействиями: управляющими и возмущающими. Управляющим воздействием для ХУМ является угол поворота направляющих колес, возмущающим – отклоняющая сила машины. При этом качение колес ХУМ происходит с боковым уводом шин, вследствие чего машина может иметь не допустимые, по условиям сбора хлопка-сырца, отклонения в боковом направлении траектории движения при повороте для входа на грядки хлопкового поля, а тяговые показатели управляемых колес ХУМ существенно снижаются.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построение математических моделей и проведение кинематических расчетов для определения параметров движения и значений боковых сил, коэффициентов сопротивления боковому уводу шин направляющих колес ХУМ необходимых для достижения требуемых

эксплуатационных качеств и сохранения заданной точности траекторного движения по поворотной полосе хлопкового поля при приемлемых тяговых показателях.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Динамические процессы очень сложны, и их трудно проанализировать в полном объеме. В основе разработанных моделей лежат уравнения баланса и не рассматривается движение колес по отдельности с учетом прогибов шин. Такие модели не отражают реальные показатели управляемости и устойчивости прямолинейных и криволинейных движений машинных агрегатов [1–7].

В данной работе рассмотрено движение каждого колеса, прогиб шин и распределение массы по опорам колес ХУМ с целью получения более точных значений параметров движения.

В соответствии с расчетной схемой, представленной на рис. 1, составим обобщенную математическую модель горизонтальных колебаний ХУМ МХ-1.8 в процессе передвижения по неровностям на поворотной полосе хлопкового поля в форме уравнений Лагранжа второго рода [1, 2, 8–11]:

$$\left. \begin{aligned} m_M \ddot{x}_M &= F_M - b_{пл}(\dot{x}_M - \dot{x}_{кпл}) - c_{пл}(x_M - x_{кпл}) - b_{пп}(\dot{x}_M - \dot{x}_{кпп}) - c_{пп}(x_M - x_{кпп}) \\ m_{кпл} \ddot{x}_{кпл} &= b_{пл}(\dot{x}_M - \dot{x}_{кпл}) + c_{пл}(x_M - x_{кпл}) - m_{кпл} \frac{2\pi^2 V^2}{l_s^2} h_{пл} \sin \frac{2\pi V_{кпл}}{l_s} t \\ m_{кпп} \ddot{x}_{кпп} &= b_{пп}(\dot{x}_M - \dot{x}_{кпп}) + c_{пп}(x_M - x_{кпп}) - m_{кпп} \frac{2\pi^2 V^2}{l_s^2} h_{пп} \sin \frac{2\pi V_{кпп}}{l_s} t \\ (m_{кзл} - 0.5 \cdot m_d) \ddot{x}_{кзл} &= b_{зл}(\dot{x}_M - \dot{x}_{кзл}) + c_{зл}(x_M - x_{кзл}) - (m_{кзл} - 0.5 \cdot m_d) \frac{2\pi^2 V^2}{l_s^2} h_{зл} \sin \frac{2\pi V_{кзл}}{l_s} t \\ (m_{кзп} - 0.5 \cdot m_d) \ddot{x}_{кзп} &= b_{зп}(\dot{x}_M - \dot{x}_{кзп}) + c_{зп}(x_M - x_{кзп}) - (m_{кзп} - 0.5 \cdot m_d) \frac{2\pi^2 V^2}{l_s^2} h_{зп} \sin \frac{2\pi V_{кзп}}{l_s} t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где \dot{x}_i и \ddot{x}_i – линейные скорости и ускорения передних и задних колес машины; b_i , c_i – коэффициенты вязкого сопротивления и жесткости шины колеса машины; m_i – масса машины и распределенная масса по опорам машины; h_n – высота неровности дороги; V_i – скорости движения передних и задних колес машин.

Коэффициенты жесткости шин колеса ХУМ определены формулой Хайдекеля [4] и коэффициенты вязкого сопротивления по формуле [5]

$$c_i = \frac{G}{h_{ш}} = \frac{m_i g}{h_{ш}}, \quad b_i = \frac{0,64 \cdot c_i}{2\pi v_i},$$

где $h_{ш}$ – прогиб шины; v_i – скорости движения колес ХУМ.

Система (1) решена с применением численных методов Рунге–Кутты с помощью программного комплекса [12] при начальных условиях $t = 0$. Результаты работы приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Вычислительный эксперимент проведен при следующих значениях параметров при прогибе шины $h_{ш}=30 \text{ мм}=0,03 \text{ м}$: $c_{пл}=836139 \text{ Н/м}$; $b_{пл}=70973,68 \text{ Нс/м}$; $c_{пп}=836139 \text{ Н/м}$; $b_{пп}=70973,68 \text{ Нс/м}$; $c_{зл}=425100 \text{ Н/м}$; $b_{зл}=36083,61 \text{ Нс/м}$; $c_{зп}=425100 \text{ Н/м}$; $b_{зп}=36083,61 \text{ Нс/м}$; $m_M=7714 \text{ кг}$; $m_{кпл}=2557 \text{ кг}$; $m_{кпп}=2557 \text{ кг}$; $m_{кзл}=1300 \text{ кг}$; $m_{кзп}=1300 \text{ кг}$; $m_d=1262 \text{ кг}$; $r_1=0,785 \text{ м}$; $r_2=0,43 \text{ м}$; $h_{пл}=0,07 \text{ м}$; $h_{ш}=0,03 \text{ м}$; $l_1=2,26 \text{ м}$; $l_2=3,65 \text{ м}$; $l_3=2,75 \text{ м}$; $l_4=0,85 \text{ м}$; $l_5=0,9 \text{ м}$; $l_6=0,35 \text{ мм}$; $V_M=1,2 \text{ м/с}$; $F_M=2060 \text{ Н}$.

Определим силы, действующие на колеса хлопковых машин. Кинематические параметры

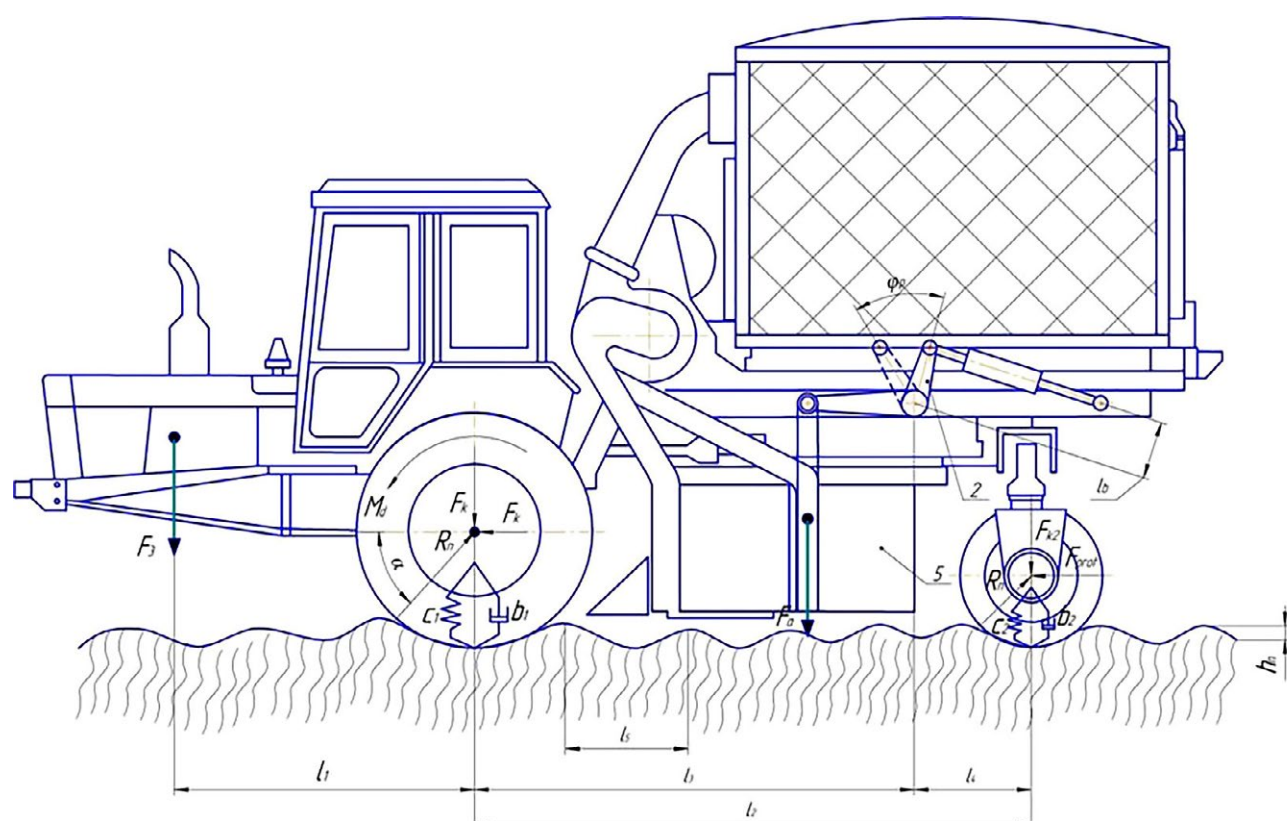


Рис. 1. Расчетная схема ХУМ МХ-1.8: 1 – гидроцилиндр; 2 – рычаг для соединения гидроцилиндра; 3 – вал качалок; 4 – рычаги для навески уборочных аппаратов; 5 – уборочные аппараты.

Fig. 1. Analytical scheme of the MKh-1.8 CHM: 1 – a hydraulic cylinder; 2 – a lever for connecting the hydraulic cylinder; 3 – a shaft of bellcranks; 4 – levers for hanging harvesters; 5 – harvesters.

Таблица 1. Значения параметров функционирования ХУМ МХ-1.8 для горизонтальных колебаний при $h=30$ мм

Table 1. Values of operation parameters of the MKh-1.8 CHM for horizontal oscillations at $h=30$ mm

T , с	\dot{x}_m , м/с	\ddot{x}_m , м/с ²	F_m , Н	$\dot{x}_{кнл}$, м/с	$\ddot{x}_{кнл}$, м/с ²	$F_{кнл}$, Н	$\dot{x}_{кнп}$, м/с	$\ddot{x}_{кнп}$, м/с ²	$F_{кнп}$, Н	$\dot{x}_{кзл}$, м/с	$\ddot{x}_{кзл}$, м/с ²	$F_{кзл}$, Н	$\dot{x}_{кзн}$, м/с	$\ddot{x}_{кзн}$, м/с ²	$F_{кзн}$, Н
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0	2.86	22060	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,17	1,42	10937,5	0,14	1,734	4435,89	0,14	1,734	4435,89	0,156	1,56	1042,63	0,156	1,56	1042,63
0,2	0,31	1,49	11471,2	0,3	1,58	4038,53	0,3	1,58	4038,53	0,3	1,5	1011,5	0,3	1,5	1011,5
0,3	0,46	1,52	11742,2	0,46	1,55	3960,85	0,46	1,55	3960,85	0,46	1,54	1029,6	0,46	1,54	1029,6
0,4	0,61	1,56	12018,5	0,6	1,55	3962,77	0,62	1,55	3962,77	0,6	1,55	1038,9	0,6	1,55	1038,9
0,5	0,76	1,4	10803,0	0,76	1,3	3332,24	0,76	1,3	3332,24	0,76	1,346	900,66	0,76	1,346	900,66
0,6	0,88	0,88	6816,1	0,87	0,8	2067,54	0,87	0,8	2067,54	0,87	0,85	570,03	0,87	0,85	570,03
0,7	0,95	0,44	3399,9	0,93	0,5	1296,54	0,93	0,5	1296,54	0,94	0,488	326,78	0,94	0,488	326,78
0,8	0,99	0,45	3482,96	0,98	0,61	1557,89	0,98	0,61	1557,89	0,986	0,53	355,382	0,986	0,53	355,382
0,9	1,06	1,06	8161,9	1,07	1,27	3266,65	1,07	1,27	3266,65	1,06	1,148	768,45	1,06	1,148	768,45
1	1,2	1,56	12040,7	1,2	1,142	2919,6	1,22	1,142	2919,6	1,2	1,32	884,787	1,2	1,32	884,787

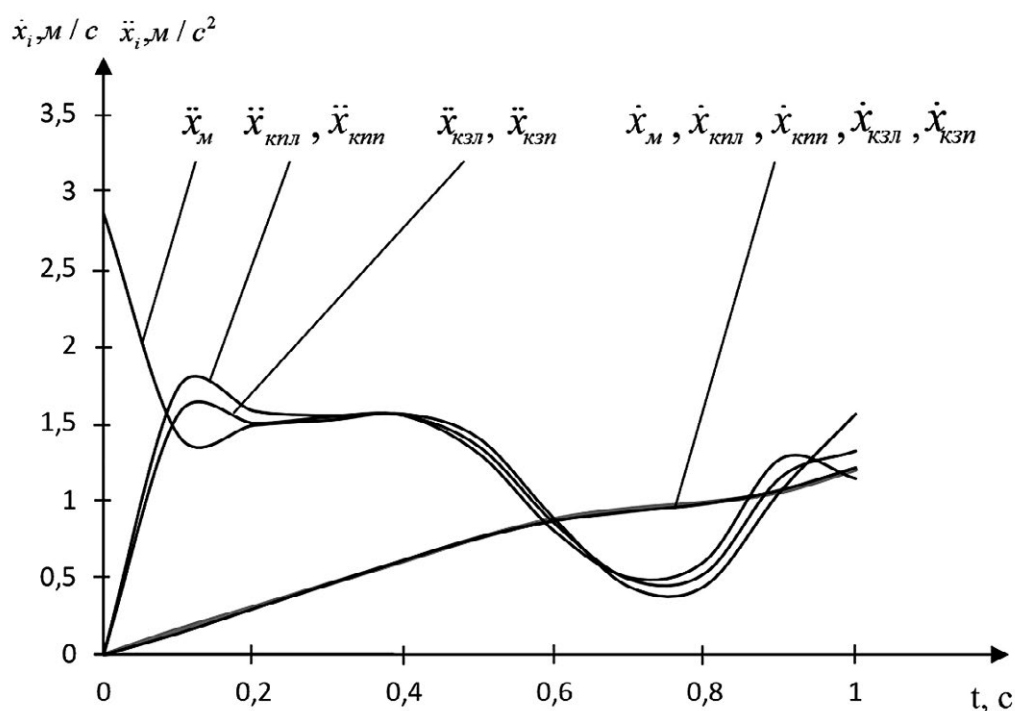


Рис. 2. Характер изменения параметров движения ХУМ МХ-1.8 для горизонтальных колебаний при $h_{ш}=30$ мм.

Fig. 2. The behavior of the motion parameters of the MKh-1.8 CHM for horizontal oscillations at $h_{ш}=30$ mm.

криволинейного движения: радиус поворота, смещение центра поворота, угловые и линейные скорости движения колес трактора, траектория его движения зависят от конструктивных и эксплуатационных факторов.

В реальных эксплуатационных условиях криволинейного движения ХУМ всегда присутствует боковой увод колес. Но рассмотрим сначала, в каких соотношениях должны быть углы поворота различных колес в предположении,

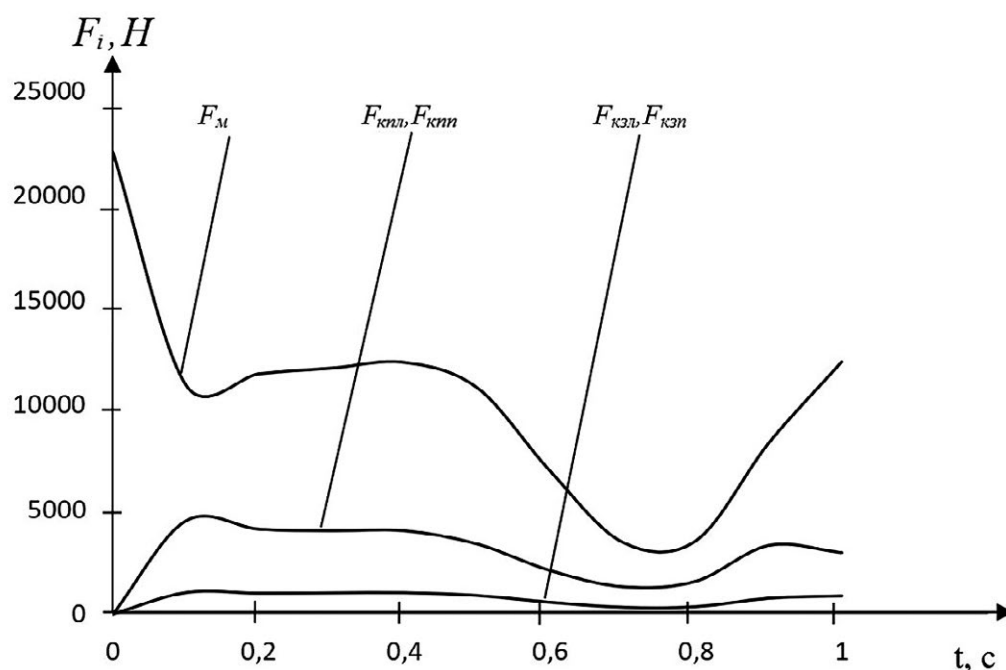


Рис. 3. Характер изменения движущих сил машины и колес ХУМ МХ-1.8 для горизонтальных колебаний при $h_{ш}=30$ мм.

Fig. 3. The behavior of the change in the driving forces of the machine and the wheels of the MKh-1.8 CHM for horizontal oscillations at $h_{ш}=30$ mm.

что колеса – жесткие в боковом направлении, т.е. отсутствует их увод и колеса катятся в плоскости своего вращения [4, 14].

В нашем случае, когда у двухосной машины управляемое колесо только одной оси, то получим

$$\frac{CO}{BC} = \operatorname{ctg} \alpha_n; \quad \frac{DO}{AD} = \operatorname{ctg} \alpha_b,$$

$$AD = a = c \cdot \sin \alpha_n = 2236,725 \cdot 0,85264 = 1907,12 \text{ мм},$$

$$DO = b = c \cdot \cos \alpha_n = 2236,725 \cdot 0,52250 = 1168,68 \text{ мм},$$

$$CO = b + l_0 = 1168,68 + 1730 = 2898,68 \text{ мм}.$$

Вычитая из первого равенства второе, и имея в виду $AD=BC$, получим

$$\operatorname{ctg} \alpha_n - \operatorname{ctg} \alpha_b = \frac{l_0}{L} = \frac{1730}{3630} = 0.474,$$

где l_0 – расстояние между осями шкворней поворотных цапф.

При имеющихся реальных соотношениях l_0/L разность углов поворота внутренних и наружных управляемых колес в среднем составляет доли градуса (рис. 5). Поэтому в большинстве случаев с достаточной для практики точностью можно вести расчеты, принимая средний

угол поворота колес $\alpha = \frac{\alpha_n + \alpha_b}{2}$, и рассматривать так

называемую велосипедную схему поворота, в которой два колеса одной оси как бы объединяются в одно. Преимущество этой схемы – сокращение, приблизительно,

в 2 раза количества уравнений, описывающих движение машины [4, 6–7, 14].

Радиус поворота, называемый кинематическим радиусом, определяется как

$$R = \frac{L}{\operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_n + \alpha_b}{2} \right)} = \frac{L}{\operatorname{tg} \alpha} =$$

$$= \frac{3650}{\operatorname{tg} 49^\circ 15'} = \frac{3650}{1,16056} = 3145,03 \text{ мм}$$

$$R_n = \frac{L}{\operatorname{tg} \alpha_n} = \frac{3650}{\operatorname{tg} 58^\circ 30'} = \frac{3650}{1,63185} = 2236,725 \text{ мм},$$

$$R_b = \frac{L}{\operatorname{tg} \alpha_b} = \frac{3650}{\operatorname{tg} 40^\circ} = \frac{3650}{0,83910} = 4349,9 \text{ мм}$$

где L – база ХУМ; α – средний угол поворота управляемых колес; O – центр поворота трактора.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим кинематическую схему поворота ХУМ МХ-1.8 с передними ведущими и задними управляемыми колесами (рис. 4). Примем, что ХУМ МХ-1.8 движется с малой постоянной скоростью, когда центробежной силой можно пренебречь [4, 14].

Касательная сила тяги переднего моста $F_{кп}$ приложена в точке A_1 и направлена вдоль продольной оси трактора. При этом точка A_1 перемещается со скоростью V_1 в направлении действия силы тяги переднего моста,

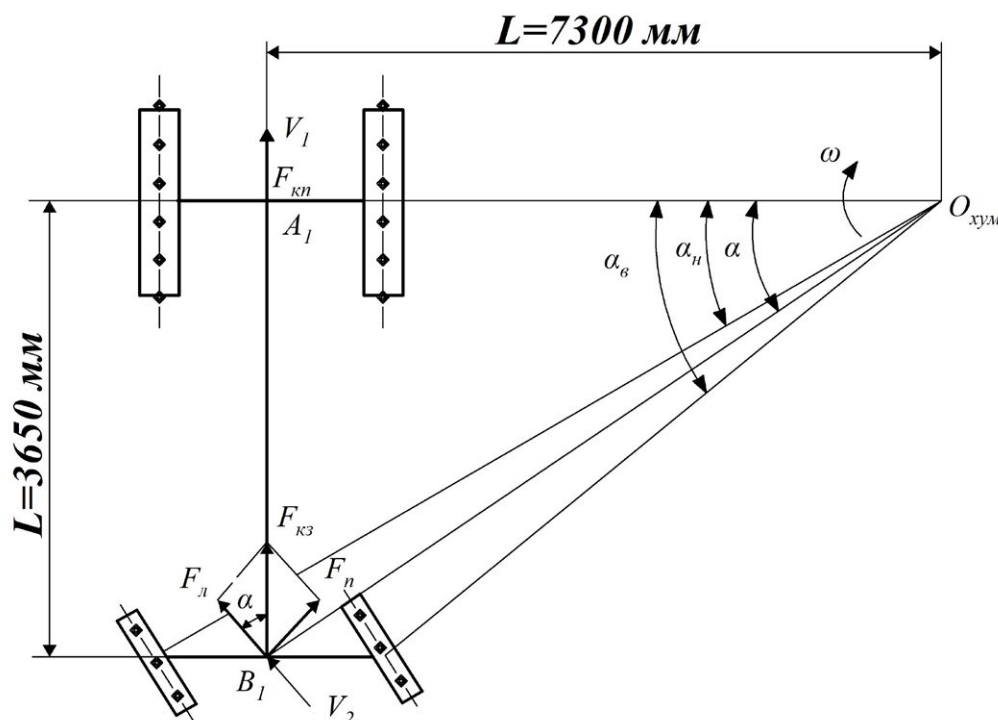


Рис. 4. Кинематическая схема поворота хлопкоуборочной машины МХ-1.8 с задними управляемыми колесами.

Fig. 4. Kinematic scheme of turning of the MKh-1.8 cotton-harvesting machine with rear steered wheels.

так как при отсутствии боковых сил нет никаких причин ее изменения. Управляемые колеса заднего моста, повернутые на средний угол $\alpha_{\text{ср}} = 49.15^\circ$, перемещаются под действием протягивающей силы

$$F_{\text{кэл}} = (m_{\text{кэл}} - m_{\text{д}}) \ddot{x}_{\text{кэл}}, \quad F_{\text{кэл}} = (m_{\text{кэл}} - m_{\text{д}}) \ddot{x}_{\text{кэл}},$$

передаваемой мосту от продольной рамы ХУМ. Протягивающая сила приложена в точке B_1 и действует вдоль продольной рамы ХУМ МХ-1.8. Разложим эту силу на две составляющие:

$$F_{\text{л}} = F_{\text{кэл}} \cos \alpha_{\text{ср}}, \quad F_{\text{л}} = F_{\text{кэл}} \cos \alpha_{\text{ср}},$$

направленную под углом α к продольной оси машины и силу

$$F_{\text{л}} = F_{\text{кэл}} \sin \alpha_{\text{ср}}, \quad F_{\text{н}} = F_{\text{кэл}} \sin \alpha_{\text{ср}},$$

перпендикулярную силе $F_{\text{л}}$.

Кроме того, боковой увод и есть тот самый параметр, который отражает воздействие на машину внешних силовых факторов, сопровождающих криволинейное движение.

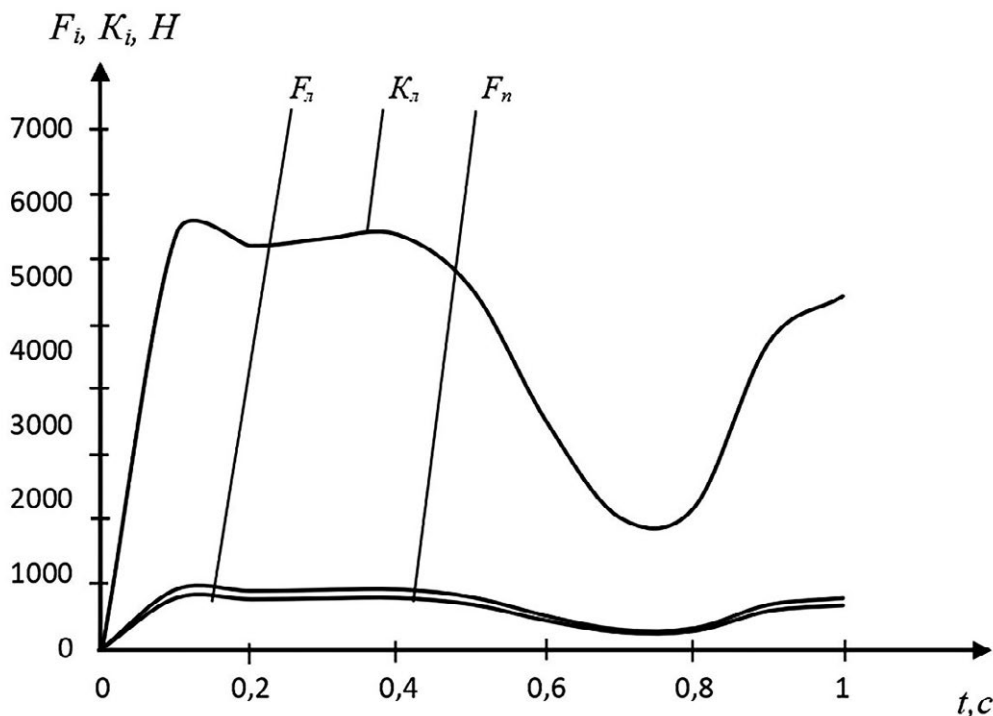


Рис. 5. Характер изменения составляющих продольных сил, коэффициента сопротивления боковому уводу колеса.
Fig. 5. The behavior of the components of the longitudinal forces and the wheel lateral slip resistance coefficient.

Таблица 2. Значения составляющих продольных сил и коэффициента сцепления колеса

Table 2. The values of the components of longitudinal forces and the wheel grip coefficient

$T, \text{с}$	$F_{\text{л}}, \text{Н}$	$K_{\text{л}}, \text{Н/рад}$	$F_{\text{н}}, \text{Н}$
0	0	0	0
0,1	681,88	5589,2	788,646
0,2	661,52	5422,3	765,1
0,3	673,36	5519,34	778,79
0,4	679,44	5569,18	785,82
0,5	589,03	4828,1	681,26
0,6	372,8	3049,2	431,17
0,7	213,7	1751,64	247,176
0,8	232,42	1905,08	268,81
0,9	502,56	4119,34	581,25
1	578,65	4743,03	669,25

В реальных эксплуатационных условиях углы δ_i бокового увода могут достигать от 7° до 12° [4]. Для нашего случая принимаем $\delta = 7^\circ = 0,122$ рад.

В общем случае с учетом угла бокового увода можно определить коэффициент сопротивления боковому уводу управляемых колес по формуле [4, 14]

$$K_{\alpha} = \frac{F_{\alpha}}{\delta}.$$

Как известно, на величину бокового увода при повороте ХУМ будет оказывать влияние боковое скольжение и боковая деформация элементов движения.

Результаты работы приведены в табл. 2 и на рис. 5

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Анализируя полученные результаты, можно отметить следующее: при криволинейном движении ХУМ основными параметрами, определяющими поворот машины, являются база ХУМ, средний угол поворота управляемых колес и углы бокового увода задней оси. Причём необходимо отметить, что углы бокового увода передней и задней оси ХУМ, их значение и изменение будут оказывать существенное влияние на кинематику поворота машины. Именно наличие бокового увода есть основная первопричина значительных отклонений от заданной траектории движения ХУМ на поворотной полосе хлопкового поля. Поэтому толкающие силы должны быть больше или равной силе сопротивления качению, т.е. $F_n \geq F_{\alpha}$. Причём, их влияние будет оказано в большей степени в условиях движения ХУМ по неровностям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдазимов А.Д., Азимов Б.М., Сулюкова Л.Ф. Моделирование колебаний направляющих колес полунавесной хлопкоуборочной машины МХ-1.8 // Международная научно-практическая конференция «Техника будущего: перспективы развития сельскохозяйственной техники». КубГАУ. 15–16 мая 2013 г. Краснодар, 2013. С. 149–150.
2. Азимов Б.М., Усманов И.И., Рузикулов А.Р., и др. Моделирование, оптимальное управление движением и расчета составляющих боковых сил направляющих колес хлопкоуборочной машины МХ-1.8 // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». 2016. № 2. С. 50–60.
3. Беляев А.Н., Оробинский В.И., Тришина Т.В., и др. Определение углов бокового увода шин колес трактора // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения материалы международной научно-практической конференции. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2018. С.16–23.
4. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е., и др. Тракторы: Теория. М.: Машиностроение, 1988.
5. Асташев В.К., Бабицкий В.И., Вульфсон И.И. Динамика машин и управление машинами: Справочник. М.: Машиностроение, 1988.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Б.М. Азимов — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, утверждение финальной версии; Ш.З. Ихсанова — поиск публикаций по теме статьи, редактирование текста рукописи, создание изображений. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. B.M. Azimov — search for publications, writing the text of the manuscript, approval of the final version; Sh.Z. Ihsanova — search for publications, editing the text of the manuscript, creating images. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

6. Дудников С.А. Исследование кинематики поворота трактора класса 1,4 на полугусеничном ходу в условиях Амурской области. дисс. ... канд. техн. наук. Благовещенск, 2012.
7. Трояновская И.П. Методология моделирования криволинейного движения тракторных агрегатов. дисс. ... д-ра. техн. наук. Челябинск, 2011.
8. Azimov B.M., Yakubjanova D.K., Kubaev S.T. Modeling and optimal control of motion of cotton harvester MH-2.4 under horizontal oscillations // International journal of advanced research in science, engineering and technology. 2018. Vol. 5, N 9. P. 6906–6914.
9. Azimov B.M., Yakubjanova D.K. Modeling and optimal control of motion of cotton harvesting machines MX-1.8 and hitching systems of picking apparatus under vertical oscillations // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1210. P. 012004 doi: 10.1088/1742-6596/1210/1/012004
10. Azimov B.M., Kubaev S.T., Axmedov Sh.A., et al. Motion study of four-row cotton harvester and the hitch system of harvesting unit under vertical vibrations // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research in Dynamical (IJMPERD). 2020. Vol. 10, N 3. P. 5501–5510.

11. Azimov B.M., Yakubjanova D.K., Kubaev S.T., et al. Mayer Problem Application in Optimal Control of the Hitching Systems of Cotton-Harvesting Machines // *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 2020. Vol. 7, N 5. P. 13630–13635.
12. Решение об официальной регистрации программы для электронно-вычислительных машин № DGU 20201456. Т. 2020. Азимов Б.М., Рузикулов А.Р., Ахмедов Ш.А., и др. Комплекс программ расчета оптимальных параметров горизонтальных и вер-

тикальных колебаний хлопкоуборочных машин при различных условиях движения.

13. Емельянов А.М., Щитов С.В., Фролова Г.Н. Математическое моделирование исследования криволинейного движения трактора МТЗ-82 со сдвоенными колесами // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2022. № 1. С. 101–109.

14. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. М.: Машиностроение, 1990. С. 89–94.

REFERENCES

1. Abdazimov AD, Azimov BM, Sulyukova LF. Modelirovanie kolebaniy napravlyayushchikh koles polunavesnoy khlopkouborochnoy mashiny MKh-1.8. In: *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Tekhnika budushchego: perspektivy razvitiya selskokhozyay-stvennoy tekhniki»*. KubGAU. 15–16 May 2013. Krasnodar; 2013:149–150. (in Russ).
2. Azimov BM, Usmanov II, Ruzikulov AR, et al. Modelirovaniye, optimalnoye upravleniye dvizheniem i rascheta sostavlyayushchikh bokovykh sil napravlyayushchikh koles khlopkouborochnoy mashiny MKh-1.8. *Uzbekskiy zhurnal «Problemy in-formatiki i energetiki»*. 2016;2:50–60.
3. Belyaev AN, Orobinskiy VI, Trishina TV, et al. Opredeleniye uglov bokovogo uvoda shin koles traktora. In: *Nauka i obrazovanie na sovremennom etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. Imperatora Petra I; 2018:16–23. (in Russ).
4. Guskov VV, Velev NN, Atamanov YuE, et al. *Tractors: Theory*. Moscow: Mashinostroenie; 1988. (in Russ).
5. Astashev VK, Babitsky VI, Vulfson II. *Dynamics of machines and control of machines: A Handbook*. M.: Mashinostroenie; 1988. (in Russ).
6. Dudnikov S.A. Issledovanie kinematiki povorota traktora klassa 1,4 na polugusenich-nom khodu v usloviyakh Amurskoy oblasti. [dissertation] Blagoveshchensk; 2012. (in Russ).
7. Troyanovskaya IP. Metodologiya modelirovaniya krivolineynogo dvizheniya traktornykh agregatov. [dissertation] Chelyabinsk; 2011. (in Russ).
8. Azimov BM, Yakubjanova DK, Kubaev ST. Modeling and optimal control of motion of cotton harvester MH-2.4 under horizontal

oscillations. *International journal of advanced research in science, engineering and technology*. 2018;5(9):6906–6914.

9. Azimov BM, Yakubjanova DK. Modeling and optimal control of motion of cotton harvesting machines MX-1.8 and hitching systems of picking apparatus under vertical oscillations. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1210:012004 doi: 10.1088/1742-6596/1210/1/012004

10. Azimov BM, Kubaev ST, Axmedov SHA, et al. Motion study of four-row cotton harvester and the hitch system of harvesting unit under vertical vibrations. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research in Dynamical (IJMPERD)*. 2020;10(3):5501–5510.

11. Azimov BM, Yakubjanova DK, Kubaev ST, et al. Mayer Problem Application in Optimal Control of the Hitching Systems of Cotton-Harvesting Machines. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 2020;7(5):13630–13635.

12. Resheniye ob ofitsialnoy registratsii programmy dlya elektronno-vychislitelnykh mashin № DGU 20201456. Т. 2020. Azimov BM, Ruzikulov AR, Akhmedov ShA, et al. Kompleks programm rascheta optimalnykh parametrov gorizontalnykh i vertikalnykh kolebaniy khlopkouborochnykh mashin pri razlichnykh usloviyakh dvizheniya. (in Russ).

13. Emelyanov AM, Shitov SV, Frolova GN. Mathematical modeling of the study of the curvilinear motion of the MTZ-82 tractor with dual wheels. *Dalnevostochnyy agrarnyy vestnik*. 2022;1:101–109. (in Russ).

14. Smirnov GA. Theory of motion of wheeled vehicles. Moscow: Mashinostroenie; 1990:89–94. (in Russ).

ОБ АВТОРАХ

* **Ихсанова Шаходат Зафаржон кизи**,
базовый докторант,
младший научный сотрудник;
адрес: Республика Узбекистан, 100125, Ташкент,
ул. Буз-2, д. 17А;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9528-0374>;
e-mail: smoll_princess@inbox.ru

Азимов Бахтиер Магрупович,
д-р техн. наук,
заведующий лабораторией «Виртуальная
и расширенная реальность»;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5352-3513>;
e-mail: mahmudazim9426@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

* **Shahodat Z. Ikhsanova**,
Basic Doctoral Student,
Junior Researcher Associate;
address: 17A Boz-2 street, 100125 Tashkent, Uzbekistan;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9528-0374>;
e-mail: smoll_princess@inbox.ru

Bakhtiyor M. Azimov,
Dr. Sci. (Tech.),
Head of the Virtual and Augmented Reality Lab;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5352-3513>;
e-mail: mahmudazim9426@mail.ru

* Corresponding author