

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА  
В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИMATHEMATICAL MODELING OF A TRACTOR-MOUNTED UNIT MOVEMENT  
IN THE HORIZONTAL PLANE

**Ключевые слова:** точное земледелие, система управления движением, машинно-тракторный агрегат, уравнения Лагранжа второго рода, математическая модель, Matlab.

С каждым годом системы точного земледелия все чаще внедряются в хозяйствах Российской Федерации, неоднократно подтверждая свою экономическую эффективность и целесообразность. Одной из ключевых составляющих таких систем являются устройства подруливания и автопилотирования, позволяющие осуществлять движение сельскохозяйственной техники параллельно от ряда к ряду с минимальным участием водителя в процессе управления. Однако в основном представлены дорогостоящие системы зарубежного производства. В АлтГТУ им. И.И. Ползунова проводятся исследования, целью которых является разработка отечественной системы управления движением колесных сельскохозяйственных машин, использующей спутниковые радионавигационные системы GPS/ГЛОНАСС, сопоставимой по техническим характеристикам с импортными образцами. Проверка работоспособности алгоритмов управления разрабатываемой системы осуществляется экспериментально. Полевые испытания связаны со значительными финансовыми и временными затратами, поэтому целесообразным представляется проверка работоспособности электро-механической системы управления и разработанных алгоритмов в лаборатории с использованием математического моделирования в режиме реального времени. При таком подходе большая часть механической системы, за исключением исследуемого узла, описывается механико-математической моделью в виде дифференциальных уравнений. В данной работе представлены этапы получения математической модели движения машинно-тракторного агрегата (МТА), на основе уравнений Лагранжа 2-го рода. Было проведено математическое моделирование стандартных маневров в пакете Matlab для МТА, состоящего из трактора МТЗ-1221.2 и культиватора КПЭ-3,8. Анализ полученных результатов подтвердил адекватность разработанной модели МТА, что позволяет в дальнейшем использовать ее для симуляции движения в режиме ре-

ального времени на экспериментальном стенде при отладке разрабатываемого электромеханического подруливающего устройства.

**Keywords:** precision farming, motion control system, tractor-mounted unit, Lagrange equations of the second kind, mathematical model, Matlab software.

Every year, precision farming systems are increasingly being implemented on farms in the Russian Federation, repeatedly confirming their economic efficiency and feasibility. One of the key components of such systems is steering and autopiloting devices that allow the movement of agricultural equipment in parallel from row to row with minimal involvement of the driver in the steering process. However, expensive foreign-made systems are mostly presented. The Altai State Technical University named after I.I. Polzunov is conducting research the purpose of which is to develop a domestic system for controlling the movement of wheeled agricultural machinery, using satellite radio navigation systems GPS/GLONASS comparable in technical characteristics with imported samples. The testing of the working capacity of the control algorithms of the developed system is carried out experimentally. Field tests are associated with significant financial and time costs. Therefore, it seems reasonable to test the performance of the electromechanical control system and the developed algorithms in the laboratory using mathematical modeling in real time. In this approach, most of the mechanical system, with the exception of the studied node, is described by a mechanical-mathematical model in the form of differential equations. In this paper, the stages of obtaining a mathematical model of machine-tractor unit motion based on Lagrange equations of the 2nd kind are presented. Mathematical modeling of standard maneuvers in Matlab package for machine-tractor unit consisting of tractor MTZ-1221.2 and cultivator KPE-3,8 was performed. Analysis of the obtained results confirmed the adequacy of the developed machine-tractor unit model which allows further use it for simulation of motion in real time on the experimental bench when adjusting the developed electromechanical maneuvering device.

**Ненайденко Александр Степанович**, к.т.н., начальник сектора систем научно-образовательной деятельности, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: nenaydenko.a.s@mail.ru.

**Поддубный Владимир Иванович**, д.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: poddubny@list.ru.

**Nenaydenko Aleksandr Stepanovich**, Cand. Tech. Sci., Head, Sector of Systems of Scientific and Educational Activities, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation, e-mail: nenaydenko.a.s@mail.ru.

**Poddubny Vladimir Ivanovich**, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation, e-mail: poddubny@list.ru.

### Введение

С каждым годом системы точного земледелия все чаще внедряются в хозяйствах Российской Федерации, неоднократно подтверждая свою экономическую эффективность и целесообразность. Одними из ключевых составляющих таких систем являются устройства подруливания и автопилотирования, позволяющие осуществлять движение сельскохозяйственной техники параллельно от ряда к ряду с минимальным участием водителя в процессе управления. Однако в основном применяются дорогостоящие зарубежные системы. В рамках программы развития сельского хозяйства страны, с учетом политики государства, направленной на импортозамещение сельскохозяйственной техники, актуальным является разработка отечественной системы параллельного вождения.

В АлтГТУ им. И.И. Ползунова проводятся исследования [1], ставящие целью создание отечественной системы параллельного вождения для управления движением колесными тракторами. Система должна обеспечивать дециметровую точность при выполнении полевых работ. Важными этапами при создании системы являются разработка механико-математической модели машинно-тракторного агрегата и получение

на её основе алгоритмов управления движением.

**Цель** работы – получить механико-математическую модель машинно-тракторного агрегата (МТА) с целью симуляции его движения в лабораторных условиях в реальном времени, проверить правильность полученной модели в ходе моделирования движения МТА в прикладном пакете Matlab.

### Задачи:

- 1) составить механико-математическую модель машинно-тракторного агрегата для описания его движения в горизонтальной плоскости;
- 2) разработать программу в системе Matlab для решения полученных уравнений движения;
- 3) провести математическое моделирование движения машинно-тракторного агрегата и оценить адекватность модели МТА.

**Дифференциальные уравнения движения МТА.** При составлении дифференциальных уравнений МТА были применены уравнения Лагранжа 2-го рода (1). Система имеет 4 степени свободы. Обобщенные координаты системы – координаты  $x_{c_1}$  и  $y_{c_1}$  центра масс трактора и углы поворота продольных осей трактора  $\varphi_1$  и агрегата  $\varphi_2$  в горизонтальной плоскости:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_{c_1}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_{c_1}} &= Q_{x_{c_1}}, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_{c_1}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y_{c_1}} &= Q_{y_{c_1}}; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} &= Q_{\varphi_1}, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} &= Q_{\varphi_2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\dot{x}_{c_1}, \dot{y}_{c_1}, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$  – обобщенные скорости;

$T$  – кинетическая энергия машинно-тракторного агрегата;

$Q_{x_{c_1}}, Q_{y_{c_1}}, Q_{\varphi_1}, Q_{\varphi_2}$  – обобщенные силы системы.

Трактор и агрегат при перемещении в горизонтальной плоскости совершают плоскопараллельное движение. В этом случае кинетическая энергия определяется как сумма кинетической энергии в поступательном движении с центром масс и вращении относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс. Кинетическая энергия системы равна сумме кинетической энергии трактора и агрегата (2):

$$T = \frac{m_1[\dot{x}_{c_1}^2 + \dot{y}_{c_1}^2] + J_{c_1}\omega_1^2 + J_{c_2}\omega_2^2 + m_2[\dot{x}_{c_1} + \omega_1(c+b)\sin\varphi_1 + \omega_2 d\sin\varphi_2]^2}{2} + \frac{m_2[\dot{y}_{c_1} - \omega_1(c+b)\cos\varphi_1 - \omega_2 d\cos\varphi_2]^2}{2}, \quad (2)$$

где  $m_1$  – масса трактора;

$m_2$  – масса агрегата;

$\dot{x}_{c_1}, \dot{y}_{c_1}$  – проекции скорости центра масс  $c_1$  трактора на оси горизонтальной плоскости;

$\omega_1, \omega_2$  – угловые скорости трактора и агрегата в горизонтальной плоскости;

$J_{c_1}, J_{c_2}$  – центральные осевые моменты инерции трактора и агрегата.

Боковые силы в модели представлены как функции угла увода и действуют в контакте колеса с опорной поверхностью. Углы увода выражаются через кинематические параметры движения звеньев МТА и их геометрические размеры. Последовательность получения выражений для определения углов увода детально изложена в [2]. Выражения для углов увода имеют вид:

$$\begin{aligned} \delta_A &= \alpha - \arctan \frac{-\dot{x}_{c_1} \sin \varphi_1 + \dot{y}_{c_1} \cos \varphi_1 + \dot{\varphi}_1 a}{\dot{x}_{c_1} \cos \varphi_1 + \dot{y}_{c_1} \sin \varphi_1 - 0.5L_1\dot{\varphi}_1}; \\ \delta_B &= \alpha - \arctan \frac{-\dot{x}_{c_1} \sin \varphi_1 + \dot{y}_{c_1} \cos \varphi_1 + \dot{\varphi}_1 a}{\dot{x}_{c_1} \cos \varphi_1 + \dot{y}_{c_1} \sin \varphi_1 + 0.5L_1\dot{\varphi}_1}; \\ \delta_C &= -\arctan \frac{-\dot{x}_{c_1} \sin \varphi_1 + \dot{y}_{c_1} \cos \varphi_1 - \dot{\varphi}_1 b}{\dot{x}_{c_1} \cos \varphi_1 + \dot{y}_{c_1} \sin \varphi_1 + 0.5L_1\dot{\varphi}_1}; \\ \delta_D &= -\arctan \frac{-\dot{x}_{c_1} \sin \varphi_1 + \dot{y}_{c_1} \cos \varphi_1 - \dot{\varphi}_1 b}{\dot{x}_{c_1} \cos \varphi_1 + \dot{y}_{c_1} \sin \varphi_1 - 0.5L_1\dot{\varphi}_1}; \\ \delta_E &= -\arctan \frac{-\dot{x}_{c_1} \sin \varphi_2 + \dot{y}_{c_1} \cos \varphi_2 - \dot{\varphi}_1(c+b)\cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \dot{\varphi}_2 e}{\dot{x}_{c_1} \cos \varphi_2 + \dot{y}_{c_1} \sin \varphi_2 + \dot{\varphi}_1(c+b)\sin(\varphi_1 - \varphi_2) - 0.5L_2\dot{\varphi}_2}; \\ \delta_F &= -\arctan \frac{-\dot{x}_{c_1} \sin \varphi_2 + \dot{y}_{c_1} \cos \varphi_2 - \dot{\varphi}_1(c+b)\cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \dot{\varphi}_2 e}{\dot{x}_{c_1} \cos \varphi_2 + \dot{y}_{c_1} \sin \varphi_2 + \dot{\varphi}_1(c+b)\sin(\varphi_1 - \varphi_2) + 0.5L_2\dot{\varphi}_2}. \end{aligned} \quad (3)$$

На рисунке 1 представлены силы, действующие на МТА во время движения.

Силы  $\vec{F}_i$  направляются по линии векторов скоростей центров соответствующих колес, боковые силы  $\vec{T}_i$  – перпендикулярно плоскости обода.

Частные производные  $T$  (2) по обобщенным скоростям равны:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_{c_1}} = m_1\dot{x}_{c_1} + m_2(\dot{x}_{c_1} + \dot{\varphi}_1(c+b)\sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_2 d\sin\varphi_2); \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_{c_1}} = m_1\dot{y}_{c_1} + m_2(\dot{y}_{c_1} - \dot{\varphi}_1(c+b)\cos\varphi_1 - \dot{\varphi}_2 d\cos\varphi_2); \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} = J_{c_1}\dot{\varphi}_1 + m_2(c+b)\sin\varphi_1(\dot{x}_{c_1} + \dot{\varphi}_1(c+b)\sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_2 d\sin\varphi_2) + \quad (6)$$

$$+ m_2(c+b)\cos\varphi_1(-\dot{y}_{c_1} + \dot{\varphi}_1(c+b)\cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_2 d\cos\varphi_2);$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} = J_{c_2}\dot{\varphi}_2 + m_2 d\sin\varphi_2(\dot{x}_{c_1} + \dot{\varphi}_1(c+b)\sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_2 d\sin\varphi_2) + \quad (7)$$

$$+ m_2 d\cos\varphi_2(-\dot{y}_{c_1} + \dot{\varphi}_1(c+b)\cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_2 d\cos\varphi_2).$$

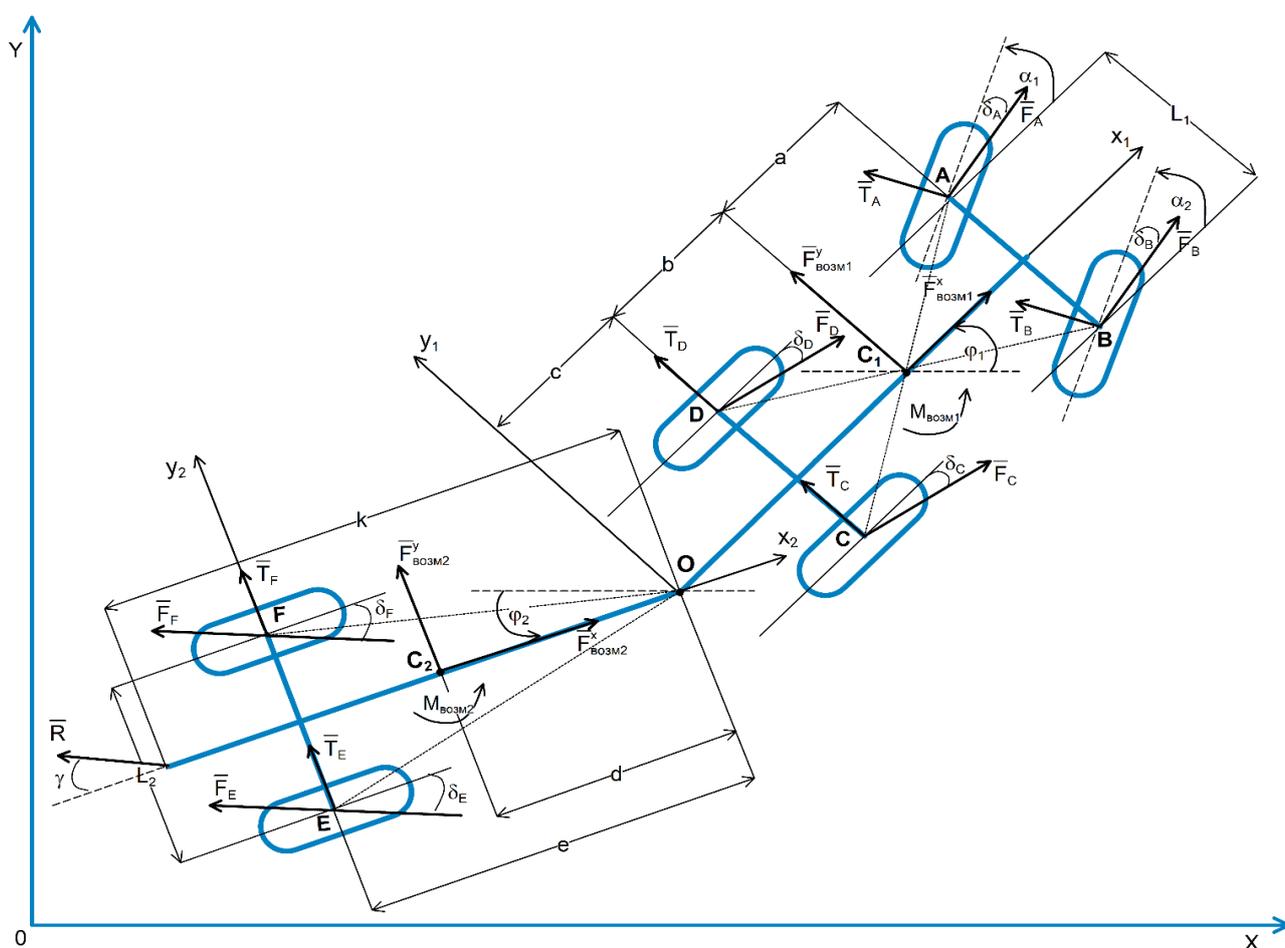


Рис. 1. Силы, действующие на МТА во время движения:

$C_1, C_2$  – центры масс трактора и агрегата;  $O$  – шарнир между трактором и агрегатом (точка прицепа);  $c$  – расстояние до задней оси трактора от шарнира  $O$ ;  
 $d, e, k$  – расстояния от центра масс, задней оси и центра сил сопротивления агрегата до шарнира  $O$ ;  $\alpha_1, \alpha_2$  – углы поворота колес передней оси трактора;  $L_1, L_2$  – ширина колеи;  
 $\varphi_1, \varphi_2$  – углы поворота продольных осей трактора и агрегата в горизонтальной плоскости;

$T_i$  – боковые силы;  $F_i$  – движущие силы и силы сопротивления;

$\delta_i$  – углы увода колес трактора и агрегата;

$F_{\text{возм1}}^x, F_{\text{возм1}}^y, F_{\text{возм2}}^x, F_{\text{возм2}}^y, M_{\text{возм1}}, M_{\text{возм2}}$  – проекции главного вектора и главного момента возмущающих сил со стороны рельефа опорной поверхности;

$R$  – главный вектор сил взаимодействия рабочих органов агрегата с почвой;

$\gamma$  – угол, составляемый главным вектором  $R$  с осью симметрии агрегата.

Производные по времени выражений частных производных кинетической энергии  $T$  системы равны:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_{c_1}} \right) = (m_1 + m_2)\ddot{x}_{c_1} + m_2(\ddot{\varphi}_1(c+b)\sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2(c+b)\cos\varphi_1 + \ddot{\varphi}_2 d \sin\varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2 d \cos\varphi_2); \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_{c_1}} \right) = (m_1 + m_2)\ddot{y}_{c_1} + m_2(-\ddot{\varphi}_1(c+b)\cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2(c+b)\sin\varphi_1 - \ddot{\varphi}_2 d \cos\varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2 d \sin\varphi_2); \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) = J_{c_1} \ddot{\varphi}_1 + m_2(c+b)\sin\varphi_1(\dot{x}_{c_1} + \dot{\varphi}_1(c+b)\sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2(c+b)\cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_2 d \sin\varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2 d \cos\varphi_2) + \varphi_1 m_2(c+b)\sin\varphi_1(\dot{x}_{c_1} + \dot{\varphi}_1(c+b)\sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_2 d \sin\varphi_2) -$$

$$-m_2(c+b)\cos\varphi_1(\ddot{y}_{c_1} - \dot{\varphi}_1(c+b)\cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2(c+b)\sin\varphi_1 - \ddot{\varphi}_2 d\cos\varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2 d\sin\varphi_2) + \quad (10)$$

$$+ \dot{\varphi}_1 m_2(c+b)\cos\varphi_1(\dot{y}_{c_1} - \dot{\varphi}_1(c+b)\cos\varphi_1 - \dot{\varphi}_2 d\cos\varphi_2);$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) = J_{c_2} \ddot{\varphi}_2 + m_2 d (\dot{x}_{c_1} \sin\varphi_2 + \dot{x}_{c_1} \dot{\varphi}_2 \cos\varphi_2 + \dot{\varphi}_1(c+b)\cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \dot{\varphi}_1(c+b)(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2)\sin(\varphi_1 - \varphi_2) - \dot{y}_{c_1} \cos\varphi_2 + \dot{y}_{c_1} \dot{\varphi}_2 \sin\varphi_2 + \dot{\varphi}_2 d). \quad (11)$$

Частные производные  $T$  по обобщенным координатам равны:

$$\frac{\partial T}{\partial x_{c_1}} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial y_{c_1}} = 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = \dot{\varphi}_1 m_2(c+b)(\dot{x}_{c_1} \cos\varphi_1 + \dot{y}_{c_1} \sin\varphi_1 - \dot{\varphi}_2 d \sin(\varphi_1 - \varphi_2)); \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = \dot{\varphi}_2 m_2 d (\dot{x}_{c_1} \cos\varphi_2 + \dot{y}_{c_1} \sin\varphi_2 + \dot{\varphi}_1(c+b)\sin(\varphi_1 - \varphi_2)).$$

Получаем выражения для вычисления обобщенных сил:

$$Q_{x_{c_1}} = (F_A \cos(\alpha_1 - \delta_A) - T_A \sin(\alpha_1) + F_B \cos(\alpha_2 - \delta_B) - T_B \sin(\alpha_2) + F_D \cos(\delta_D) + F_C \cos(\delta_C) + F_{\text{созм1}}^x) \cos(\varphi_1) - (T_A \cos(\alpha_1) + F_A \sin(\alpha_1 - \delta_A) + T_B \cos(\alpha_2) + F_B \sin(\alpha_2 - \delta_B) + F_{\text{созм1}}^y + T_D + T_C - F_D \sin(\delta_D) - F_C \sin(\delta_C)) \sin(\varphi_1) + (F_{\text{созм2}}^x - F_F \cos(\delta_F) - R \cos(\gamma) - F_E \cos(\delta_E)) \cos(\varphi_2) - (F_F \sin(\delta_F) + R \sin(\gamma) + T_F + T_E + F_E \sin(\delta_E) + F_{\text{созм2}}^y) \sin(\varphi_2);$$

$$Q_{y_{c_1}} = (F_A \cos(\alpha_1 - \delta_A) - T_A \sin(\alpha_1) + F_B \cos(\alpha_2 - \delta_B) - T_B \sin(\alpha_2) + F_D \cos(\delta_D) + F_C \cos(\delta_C) + F_{\text{созм1}}^x) \sin(\varphi_1) + (T_A \cos(\alpha_1) + F_A \sin(\alpha_1 - \delta_A) + T_B \cos(\alpha_2) + F_B \sin(\alpha_2 - \delta_B) + F_{\text{созм1}}^y + T_D + T_C - F_D \sin(\delta_D) - F_C \sin(\delta_C)) \cos(\varphi_1) + (F_{\text{созм2}}^x - F_F \cos(\delta_F) - R \cos(\gamma) - F_E \cos(\delta_E)) \sin(\varphi_2) + (F_F \sin(\delta_F) + R \sin(\gamma) + T_F + T_E + F_E \sin(\delta_E) + F_{\text{созм2}}^y) \cos(\varphi_2); \quad (13)$$

$$Q_{\varphi_1} = (T_A \cos(\alpha_1) + F_A \sin(\alpha_1 - \delta_A) + T_B \cos(\alpha_2 - \delta_B)) a - (T_D + T_C - F_D \sin(\delta_D) - F_C \sin(\delta_C)) b + (T_A \sin(\alpha_1) - F_A \cos(\alpha_1 - \delta_A) - F_D \cos(\delta_D) + F_C \cos(\delta_C) + F_B \cos(\alpha_2 - \delta_B) - T_B \sin(\alpha_2)) 0.5L_1 + M_{\text{созм1}} + M_{\text{созм2}} - (T_F + F_F \sin(\delta_F) + T_E + F_E \sin(\delta_E))(e + (c + b) \cos(\varphi_1 - \varphi_2)) - R \sin(\gamma)(k + (c + b) \cos(\varphi_1 - \varphi_2)) - R \cos(\gamma)(c + b) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + F_{\text{созм2}}^x(c + b) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - F_{\text{созм2}}^y(d + (c + b) \cos(\varphi_1 - \varphi_2)) - F_E \cos(\delta_E)(0.5L_2 + (c + b) \sin(\varphi_1 - \varphi_2)) + F_F \cos(\delta_F)(0.5L_2 - (c + b) \sin(\varphi_1 - \varphi_2));$$

$$Q_{\varphi_2} = (F_F \cos(\delta_F) - F_E \cos(\delta_E)) 0.5L_2 - (T_F + T_E)e + R \sin(\gamma)k - F_{\text{созм2}}^y d + M_{\text{созм2}}.$$

После математических преобразований уравнений (4)-(13) была получена система неоднородных нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} a_{11}\ddot{x}_{c_1} + a_{12}\ddot{y}_{c_1} + a_{13}\ddot{\varphi}_1 + a_{14}\ddot{\varphi}_2 = Q_{x_{c_1}} \\ a_{21}\ddot{x}_{c_1} + a_{22}\ddot{y}_{c_1} + a_{23}\ddot{\varphi}_1 + a_{24}\ddot{\varphi}_2 = Q_{y_{c_1}}, \\ a_{31}\ddot{x}_{c_1} + a_{32}\ddot{y}_{c_1} + a_{33}\ddot{\varphi}_1 + a_{34}\ddot{\varphi}_2 = Q_{\varphi_1}, \\ a_{41}\ddot{x}_{c_1} + a_{42}\ddot{y}_{c_1} + a_{43}\ddot{\varphi}_1 + a_{44}\ddot{\varphi}_2 = Q_{\varphi_2} \end{cases} \quad (14)$$

$$a_{11} = m_1 + m_2, a_{12} = 0, a_{13} = m_2(c+b)\sin(\varphi_1), a_{14} = m_2 d \sin(\varphi_2), a_{21} = 0, a_{22} = m_1 + m_2, a_{23} = -m_2(c+b)\cos(\varphi_1), a_{24} = m_2(c+b)\sin(\varphi_1), a_{31} = m_2(c+b)\sin(\varphi_1), a_{32} = -m_2(c+b)\cos(\varphi_1), a_{33} = J_{c_1} + m_2(c+b)^2, a_{34} = m_2(c+b)d, a_{41} = m_2 d \sin(\varphi_2), a_{42} = m_2 d(c+b)\cos(\varphi_1 - \varphi_2), a_{43} =$$

где  $J_{c_2} + m_2 d^2$ .

Обобщенные силы системы и коэффициенты при вторых производных от обобщенных координат в системе (14) зависят от обобщенных координат и скоростей системы, массовых, гео-

метрических и эксплуатационных параметров звеньев МТА.

#### Экспериментальная часть

С целью проверки адекватности полученной механико-математической модели МТА была

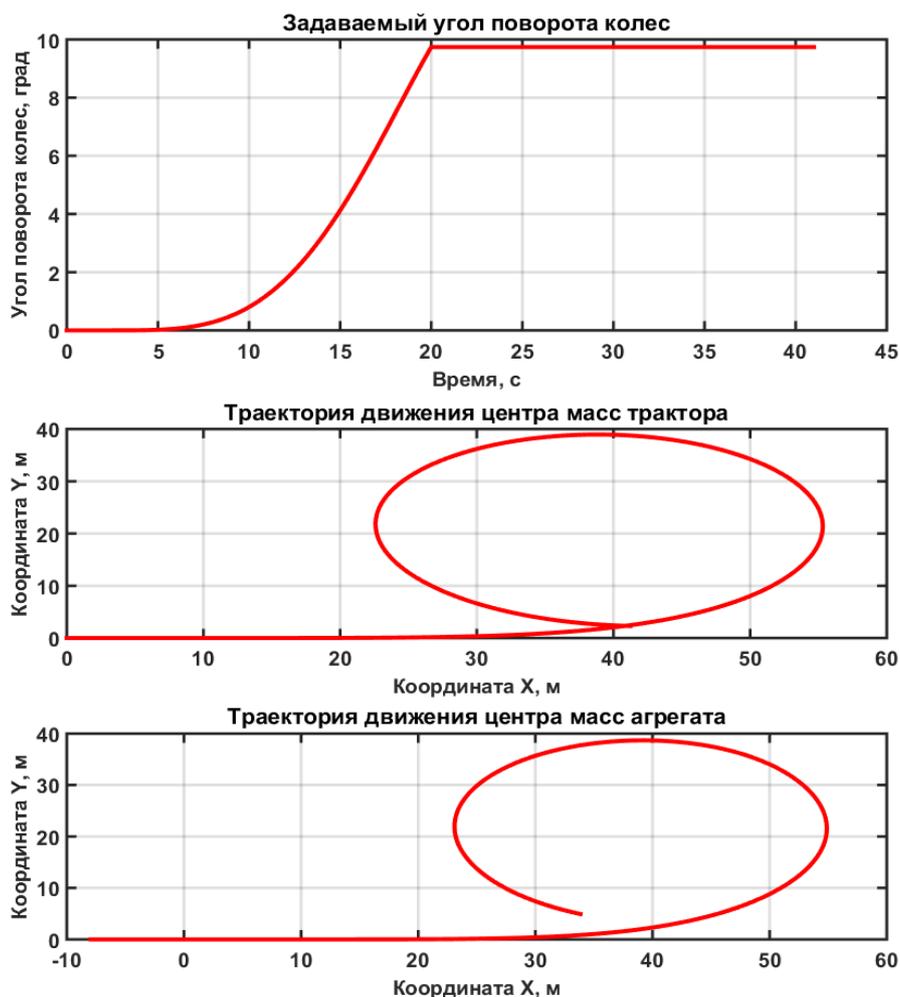
разработана программа в прикладном пакете Matlab.

Переменные состояния: координаты и скорости центра масс трактора в проекции на горизонтальные оси  $OX$  и  $OY$ ; углы поворота и угловые скорости продольных осей трактора и агрегата в горизонтальной плоскости.

Параметры модели: массовые и геометрические характеристики звеньев машинно-тракторного агрегата, движущие силы и силы сопротивления движению; центральные осевые моменты инерции звеньев МТА, главный вектор сил взаимодействия рабочих органов агрегата с почвой, коэффициенты сопротивления боковому уводу колес.

Моделировалось движение трактора МТЗ-1221.2 с культиватором КПЭ-3,8. Характеристики бокового увода колес трактора определялись расчетным путем. Значение коэффици-

ента сопротивления боковому уводу для колес передней оси было принято равным 125500 и 210500 н/рад для колес задней оси. Принимались во внимание результаты экспериментальных исследований, представленные в [3-6]. Значение коэффициента сопротивления боковому уводу для колес КПЭ-3,8 было определено экспериментально и равно 42870 н/рад. Расчетным путем, с использованием заводских данных, по массе и размерам отдельных узлов и деталей трактора был определен центральный осевой момент инерции трактора относительно вертикальной оси. В сопоставлении с результатами исследований [7] было принято значение, равное 5000 кг\*м<sup>2</sup>. Значение главного вектора сил взаимодействия рабочих органов культиватора КПЭ-3,8 с почвой определялось на основании исследований [8] и равно 20000 н.

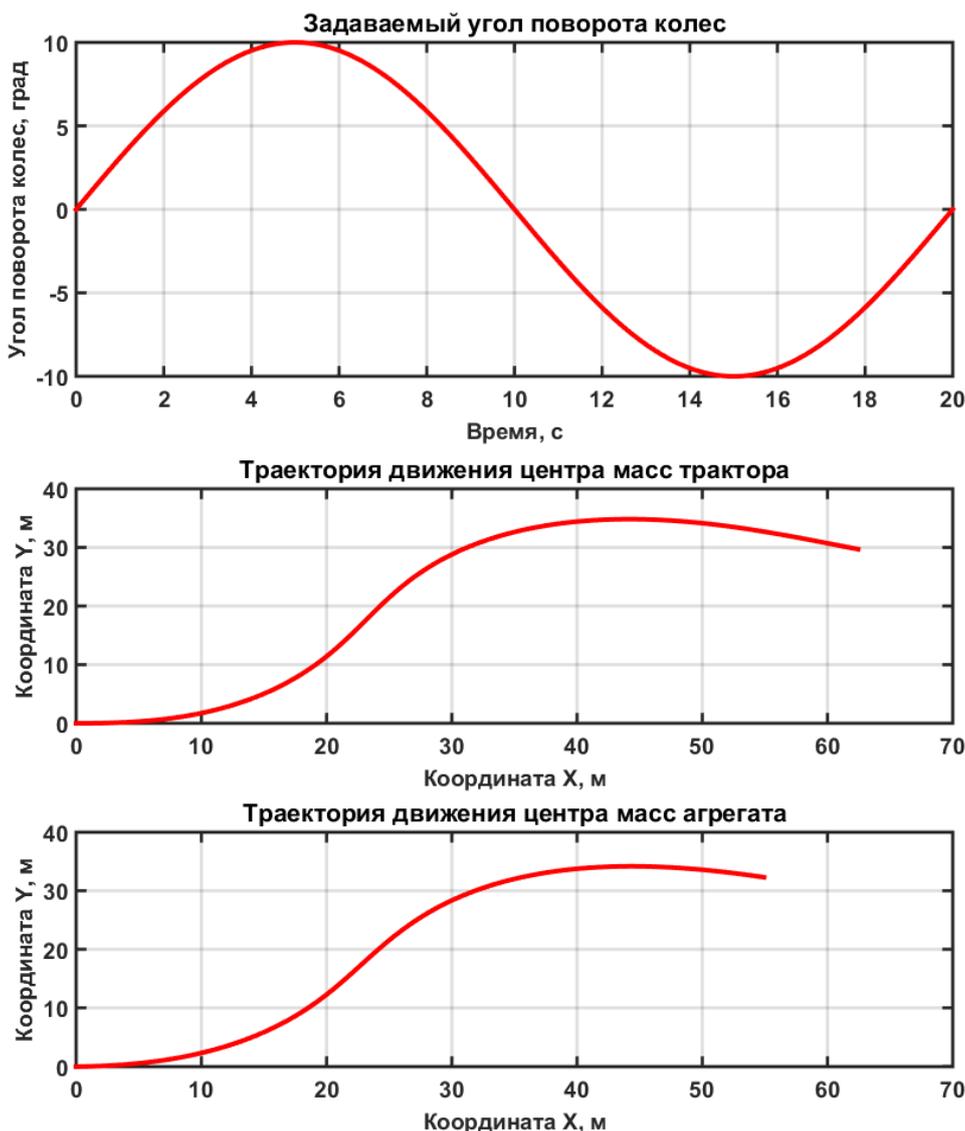


**Рис. 2. Угол поворота управляемых колес трактора и траектории центров масс трактора и агрегата при установившемся повороте**

Было проведено моделирование установившегося кругового движения МТА. Угол поворота управляемых колес и траектории центров масс трактора и агрегата для скорости движения 2,5 м/с изображены на рисунке 2. Угол поворота колес аппроксимировался функцией Step, описывающей плавный ступенчатый переход от одного значения к другому с использованием кубического полинома. Значение кинематического радиуса установившегося поворота трактора

без учета явления бокового увода колес было определено предварительно расчетным путём. При угле поворота управляемых колес  $10^\circ$  радиус равен 15,9 м.

Траектории центров масс трактора и агрегата, зависимость угла поворота управляемых колес трактора от времени при маневре «переставка» со скоростью 2,5 м/с, изображены на рисунке 3.



**Рис. 3. Угол поворота управляемых колес трактора и траектории центров масс трактора и агрегата при маневре «переставка»**

### Выводы

На основании рассмотрения результатов моделирования можно сделать вывод, что траектории звеньев МТА при установившемся повороте и переставке соответствуют действительности.

Результаты математического моделирования в среде Matlab позволяют сделать вывод об адекватности разработанной механико-математической модели реальному МТА. Модель применялась для симуляции движения машинно-тракторного агрегата в реальном времени на

испытательном экспериментальном стенде с целью отладки разрабатываемого опытного образца электромеханического подруливающего устройства.

### Библиографический список

1. Разработка системы автоматического управления движением колесных машинно-тракторных агрегатов (МТА) с использованием спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС: отчет о НИР (заключ.): 174-18/ГК / рук. В. И. Поддубный; исполн.: А. С. Павлюк, А. С. Ненайденко, Е. М. Нагорных; Алтайский государственный технический университет. – Барнаул, 2018. – 48 с. – Рег. № АААА-А18-118112890006-5. – Текст: непосредственный.
2. Ненайденко, А. С. Математическое моделирование движения колесной машины в горизонтальной плоскости / А. С. Ненайденко, В. И. Поддубный. – Текст: непосредственный // Вестник КрасГАУ. – 2018. – № 3 (138). – С. 72-77.
3. Павлюк, А. С. Исследование механических характеристик шин, влияющих на устойчивость движения мобильных машин / А. С. Павлюк, В. И. Поддубный; Алт. политехн. ин-т. – Барнаул, 1986. – 9 с. – Деп. в ЦНИИТЭИтракторсельхозмаше 07.08.86, №727-тс. – Текст: непосредственный.
4. Павлюк, А. С. Определение характеристик увода шин для исследования устойчивости движения автотранспортных средств / А. С. Павлюк, В. И. Поддубный, А. В. Величко; Алт. политехн. ин-т. – Барнаул, 1987. – 12 с. – Деп. в ЦНИИТЭИавтопроме, №1546-ап 87. – Текст: непосредственный.
5. Поддубный, В. И. Влияние эксплуатационных параметров на характеристики увода пневматического колеса / В. И. Поддубный, А. С. Павлюк. – Текст: непосредственный // Проблемы шин и резинокордных композитов. Математические методы в механике, конструировании и технологии: сборник научных трудов / НИИШП. – Москва, 1995. – С. 42-46.
6. Поддубный, В. И. Определение составляющих увода пневматического колеса / В. И. Поддубный, А. С. Павлюк. – Текст: непосредственный // Проблемы шин и резинокордных композитов: тезисы доклада 10-го юбилейного симпозиума / НИИШП. – Москва, 1999. – С. 199-202.
7. Валежанин, А. И. Экспериментальное определение массово-геометрических характеристик звеньев автопоездов / А. И. Валежанин, А. С. Павлюк. – 1986. – Деп. в ЦНИИТЭИтракторсельхозмаше. № 1320-ап. – Текст: непосредственный.
8. Устинов, Н. Н. Механико-математическая модель рабочего органа культиватора для определения тягового сопротивления при действии вибрации / Н. Н. Устинов, В. И. Поддубный, А. С. Мартыненко. – Текст: непосредственный // Достижения науки и техники АПК. – 2017. – Т. 31, № 3. – С. 98-31.

### References

1. Razrabotka sistemy avtomaticheskogo upravleniia dvizheniem kolesnykh mashinno-traktornykh agregatov (MTA) s ispolzovaniem sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem GPS i GLONASS: otchet o NIR (zakliuch.): 174-18/GK / Altaiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet; ruk. V.I. Poddubnyi; ispoln.: A.S. Pavliuk, A.S. Nenaidenko, E.M. Nagornykh. – Barnaul, 2018. – 48 s. – Reg. No. АААА-А18-118112890006-5.
2. Nenaidenko, A. S. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniia kolesnoi mashiny v gorizontnoi ploskosti / A. S. Nenaidenko, V. I. Poddubnyi // Vestnik KrasGAU. – 2018. – No. 3 (138). – S. 72–77.
3. Pavliuk, A. S. Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik shin, vliiaushchikh na ustoichivost dvizheniia mobilnykh mashin / A. S. Pavliuk, V. I. Poddubnyi; Alt. politekhn. in-t. – Barnaul, 1986. – 9 s. – Dep. v TsNIITEItraktorselkhozmashe 07.08.86, No. 727-ts.
4. Pavliuk, A. S. Opredelenie kharakteristik uvoda shin dlia issledovaniia ustoichivosti dvizheniia avtotransportnykh sredstv / A. S. Pavliuk, V. I. Poddubnyi, A. V. Velichko; Alt. politekhn. in-t. – Barnaul, 1987. – 12 s. – Dep. v TsNIITEIavtoprome, No. 1546-ap 87.
5. Poddubnyi, V. I. Vliianie ekspluatatsionnykh parametrov na kharakteristiki uvoda pnevmaticheskogo kolesa / V. I. Poddubnyi, A. S. Pavliuk // Problemy shin i rezinokordnykh kompozitov. Matematicheskie metody v mekhanike, konstruirovanii i tekhnologii: sb. nauch. tr. / NIIShP. – Moskva, 1995. – S. 42-46.
6. Poddubnyi, V. I. Opredelenie sostavliaiushchikh uvoda pnevmaticheskogo kolesa / V. I. Poddubnyi, A. S. Pavliuk // Tezisy doklada 10-go Simpoziuma «Problemy shin i rezi-

nokordnykh kompozitov. Desiatyi iubileinyi simpozium» / NIIShP. – Moskva, 1999. – S. 199-202.

7. Valekzhanin, A. I. Eksperimentalnoe opredelenie massovo-geometricheskikh kharakteristik zvenev avtopoezdov / A. I. Valekzhanin, A. S. Pavliuk // Dep. v TsNIITEltraktorselkhozmashe, 1986. – No. 1320-ap.

8. Ustinov, N.N. Mekhaniko-matematicheskaia model rabocheho organa kultivatora dlia opredeleniia tiagovogo soprotivleniia pri deistvii vibratsii / N.N. Ustinov, V.I. Poddubnyi, A.S. Martynenko // Dostizheniia nauki i tekhniki APK. – 2017. – Tom 31, No. 3. – S. 98-31.



УДК 631.173

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-213-7-116-122

С.Ю. Журавлев

S.Yu. Zhuravlev

## ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

### ORGANIZATION AND TECHNOLOGY OF TECHNICAL SERVICE OF NEW GENERATION AGRICULTURAL MACHINERY

**Ключевые слова:** организация, технология, технический сервис, техника нового поколения, сельское хозяйство.

Приведены результаты анализа состояния дел в области организации и технологии технического сервиса сельскохозяйственной техники нового поколения, поставляющейся производителями в последние десятилетия для нужд сельского хозяйства страны. Установлены основные закономерности совершенствования организационных мероприятий и содержания технологических процессов ТО и ремонта машин в АПК Российской Федерации. Объектом исследований являются результаты модернизации организационного и технологического процессов технического сервиса машин, используемых в производстве продукции АПК. В качестве материалов исследований используются последние научные данные и результаты производственного опыта осуществления технического сервиса на современном этапе хозяйствования сельхозпроизводителей. Анализ представленных результатов исследований по организации планово-предупредительной системы ТО тракторов и комбайнов российского и зарубежного производства позволяет утверждать следующее. Современная система ТО, рекомендованная российскими и белорусскими производителями сельскохозяйственной техники, основана на тех положениях в области технического сервиса машин АПК, которые были разработаны в 60-80 годы прошлого века. Зарубежные производители тракторов, комбайнов и сельскохозяйственных машин рекомендуют к использованию аналогичную российской планово-предупредительную систему ТО с определенным количеством видов ТО и с установленными нормативами наработки до момента проведения очередного ТО. Содержание технологических операций ТО сельскохозяйственной техники иностранного производства по своему составу

также во многом соответствует технологическим картам на ТО российских и белорусских тракторов и комбайнов, при этом для машин зарубежного и отечественного производства широко используются современные методики диагностики электронных систем с применением компьютерных технологий и соответствующего оборудования.

**Keywords:** organization, technology, technical service, new generation equipment, agriculture.

This paper discusses the analysis of the situation in the field of organization and technology of technical service of new generation agricultural machinery supplied by manufacturers in recent decades for the needs of the country's agriculture. The main regularities of improving organizational measures and the content of technological processes for the maintenance and repair of machines in the agro-industrial complex of the Russian Federation were identified. The research targets are the results of modernization of organizational and technological processes of technical service of machines used in agricultural production. As research materials, the latest scientific data and the results of production experience in the implementation of technical service at the current stage of management of agricultural producers are used. The analysis of the presented research results on the organization of preventive maintenance system for tractors and combines of Russian and foreign production allows stating the following: the modern maintenance system recommended by Russian and Belarusian manufacturers of agricultural machinery is based on the provisions in the field of technical service of agro-industrial complex machines which were developed in the 1960-1980s. Foreign manufacturers of tractors, combines and agricultural machines recommend the use of a similar planned preventive maintenance system to Russia with a certain number of types of maintenance and with estab-