

МЕХАТРОННАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ  
КОЛЕСНОГО МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА

## MECHATRONIC MODEL OF CONTROLLED MOTION OF A WHEELED MACHINE-TRACTOR UNIT

**Ключевые слова:** машинно-тракторный агрегат, система точного земледелия, система управления движением, алгоритм управления, базовые маневры, математическое моделирование, мехатронная модель, прикладной пакет CAMeL-View, микрорельеф поверхности поля.

Важной задачей сельскохозяйственного производства является обеспечение высокой производительности труда при качественном выполнении полевых работ. Возмущения со стороны микрорельефа поверхности поля, действие сил инерции, поперечный и продольный наклоны поля вызывают отклонения звеньев машинно-тракторного агрегата от задаваемой траектории. Это вызывает снижение качества выполняемых работ, увеличение расхода топлива вследствие увеличения пройденного пути. Вышеупомянутые проблемы могут быть решены путем использования систем точного земледелия, включающих в себя системы управления движением – подруливающие устройства и автопилоты. При разработке систем управления актуальной задачей является проведение теоретических и экспериментальных исследований для проверки их работоспособности. Разработка математического описания законов управления, обеспечивающих минимизацию отклонения звеньев машинно-тракторного агрегата от задаваемой траектории, является одной из наиболее важных задач при создании системы управления движением машинно-тракторным агрегатом. Приводится описание алгоритма управления движением колесного машинно-тракторного агрегата в составе трактора К-744 и плуга ПТК-9-35. Приведено описание мехатронной модели машинно-тракторного агрегата в прикладном пакете CAMeL-View. Модель описывает внутреннее механическое взаимодействие звеньев машинно-тракторного агрегата и взаимодействие их с поверхностью поля. В модель имплантировано описание закона управления движением для обеспечения движения по задаваемой траектории. Проведено математическое моделирование управляемого прямолинейного движения. По результатам моделирования установлено, что величина предельных поперечных

отклонений не превышает 20 см для трактора и 8 см для плуга. Алгоритм предлагаемого управления может быть использован при выполнении полевых работ с дециметровой точностью.

**Keywords:** machine-tractor unit, precision farming system, motion control system, control algorithm, basic maneuvers, mathematical modeling, mechatronic model, CamelView application package, field surface microrelief.

An important task of agricultural production is to ensure high labor productivity with quality performance of field work. Disturbances from the microrelief of the field surface, inertia forces, transverse and longitudinal slopes of the field cause deviations of machine-tractor unit links from the set trajectory. This leads to a decrease of the quality of work performed and increased fuel consumption due to the increase of the traveled distance. The above-mentioned problems may be solved by using precision farming systems that include motion control systems - thrusters and autopilots. When developing control systems, the actual task is to conduct theoretical and experimental studies to verify their performance. The development of mathematical description of control laws that minimize the deviation of machine-tractor unit links from the given trajectory is one of the most important tasks when creating a motion control system for a machine-tractor unit. This paper describes the algorithm of motion control of wheeled machine-tractor unit consisting of the tractor K-744 and plow PTK-9-35. The description of the mechatronic model of the machine-tractor unit in the CamelView software application is presented. The model describes the internal mechanical interaction of machine-tractor unit links and their interaction with the field surface. The description of the motion control law is implanted into the model to ensure movement along a given trajectory. Mathematical modeling of controlled rectilinear motion is carried out. According to the results of modeling it is found that the value of limiting transverse deviations does not exceed 20 cm for the tractor and 8 cm for the plow. The algorithm of the proposed control may be used when performing field works with decimeter accuracy.

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

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

### Введение

Применение систем точного земледелия позволяет значительно улучшить качество выполняемых полевых работ, уменьшить расход топлива, семян и гербицидов. Подруливающие устройства и автопилоты [1-4] являются важным элементом системы, обеспечивающим задаваемое рабочее движение машинно-тракторного агрегата (МТА). Важной задачей при создании автопилота является создание математического описания законов управления движением МТА и проверка их работоспособности путем математического моделирования.

**Целью** является проверка работоспособности модели управления, обеспечивающей минимизацию отклонений звеньев колесного МТА от задаваемой траектории.

**Задачи** исследования:

1) разработка мехатронной модели МТА, включающей алгоритм управления и учитывающей внутреннее и внешнее силовое взаимодействие звеньев МТА;

3) проведение математического моделирования рабочего движения МТА для проверки работоспособности предложенного алгоритма.

### Объекты и методы

При разработке законов управления принимается, что для следования МТА по задаваемой траектории необходимо одновременно выполнять базовые маневры, обеспечивающие за задаваемый промежуток времени необходимое боковое смещение центра масс трактора и поворот его продольной оси. Закон изменения угла поворота управляемых колес (угла слома рамы трактора) от продольного перемещения  $x$  имеет вид:

$$\alpha = \alpha_o + \frac{BK_L - \alpha_o}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi x}{L} \right) + \left( B \left( \frac{\theta_L}{L} - \frac{K_L}{2} \right) - \frac{\alpha_o}{2} \right) \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{L} \right) + \left( \frac{2\pi B}{L^2} \left( H - \frac{\theta_L L}{2} \right) + \frac{2(BK_L - \alpha_o)}{\pi} \right) \sin \frac{2\pi x}{L},$$

где  $\alpha_o$  – начальный угол поворота;

$B$  – база трактора;

$\theta_L$  – угол, составляемый касательной к траектории в прогнозируемом положении с касательной к траектории в текущий момент времени;

$K_L$  – текущее значение кривизны;

$H$  и  $L$  – боковое и продольное перемещение трактора за время маневра [5].

Для проверки работоспособности предлагаемого управления в программном прикладном пакете CAMeL-View [6, 7] была разработана мехатронная модель МТА в составе колесного трактора К-744 и полунавесного плуга ПТК-9-35. На рисунке 1 представлена модель на верхнем уровне иерархии.

Сочленение (joint) «Шарнир1» обеспечивает передней части трактора 6 степеней свободы относительно земли (блок «Земля»). Обобщенными координатами являются поступательные и угловые перемещения центра масс передней части «Трактор передняя часть» относительно неподвижной системы координат. Передняя и задняя части трактора представлены как твердые тела с задаваемыми массой и тензором инерции. Величины моментов инерции тел были определены расчетным путем [8]. Сочленение «Шарнир2» обеспечивает относительный поворот передней и задней части вокруг продольной и вертикальной осей, проходящих через шарнир. Блок «ПТК-9-35» описывает взаимодействие колес и рабочих органов плуга с опорной поверхностью. Поворот плуга относительно задней части трактора «Трактор задняя часть» обеспечивает «Шарнир3». Генерация различных задаваемых углов слома рамы и траекторий осуществляется в математической подсистеме «управляющие сигналы». В этой же подсистеме в математическом блоке StateSpace реализован представленный выше алгоритм управления, основанный на использовании базовых маневров. В подсистеме «Модель управления» определяется текущее значение момента слома рамы, обеспечивающего реализацию задаваемого угла слома рамы. В математической подсистеме «Крутящий момент» с использованием ПИД-регулирования определяются необходимые значения приводных моментов на колесах. Рельеф поверхности поля и вертикальные возмущения, действующие на колеса трактора, описаны в «Модель рельефа». Сгенерированные возмущения передаются в модели описания взаимодействий колес трактора с опорной поверхностью, имплантированных в модели передней и задней частей трактора. Силовое взаимодействие колес МТА с поверхностью поля представлено в [9].

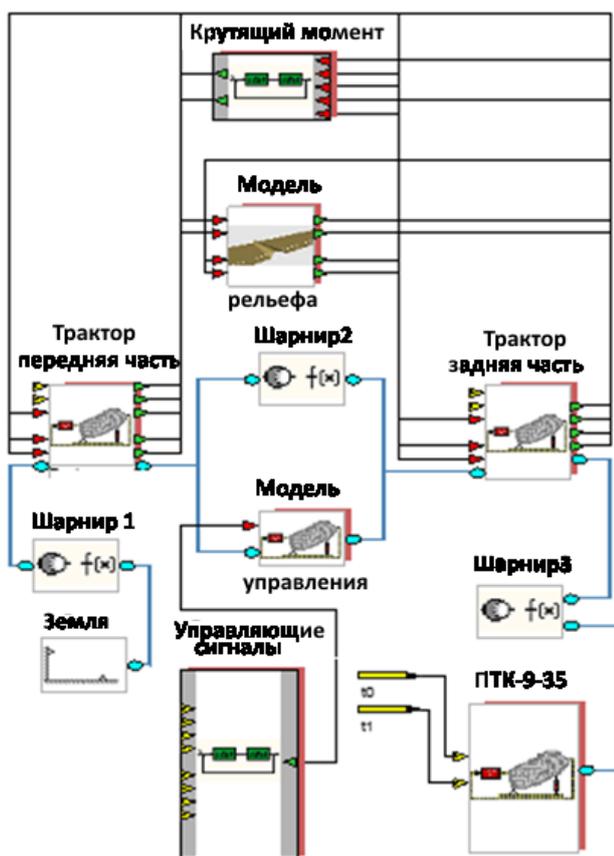


Рис. 1. Мехатронная модель МТА

### Результаты

#### математического моделирования

Моделировалось прямолинейное движение МТА. Задаваемая глубина обработки составляла 24 см, скорость движения – 2,5 м/с. На рисунке 2 приведена зависимость отклонения микропрофиля поля от времени движения для переднего левого колеса трактора. Максимальное отклонение относительно нулевого уровня составляло 6 см.

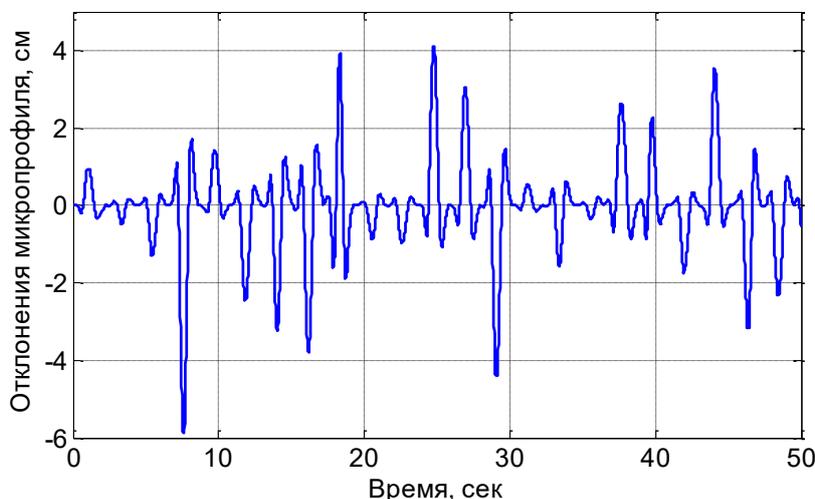


Рис. 2. Отклонения микропрофиля для переднего левого колеса

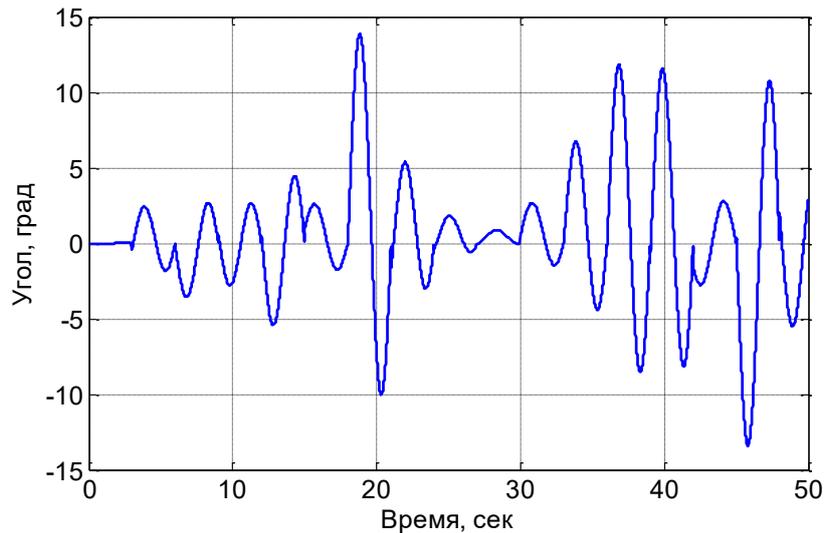
На рисунке 3 приведена зависимость управляющего угла слома рамы от времени, сгенерированного моделью управления для обеспечения движения по прямой линии.

Установлено, что при использовании разработанного алгоритма управления максимальные боковые отклонения центров масс трактора (рис. 4) и плуга (рис. 5) не превышают 20 и 8 см соответственно.

### Выводы

1. В прикладном программном пакете CAMeL-View разработана мехатронная модель колесно-машинно-тракторного агрегата (МТА) в составе трактора К-744 и полунавесного плуга ПТК-9-35 с математическим описанием внутреннего взаимодействия звеньев МТА и взаимодействий их с поверхностью поля. В модель включено математическое описание модели управления движением, основывающееся на использовании маневров для изменения кривизны траектории, направления движения и поперечного смещения. Создана модель микро рельефа поля для описания вертикальных возмущений, действующих на колеса трактора и плуга.

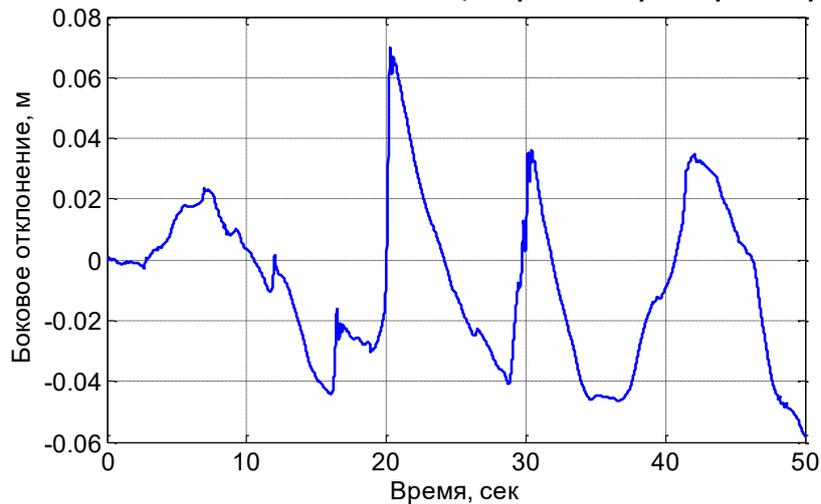
2. Проведено математическое моделирование задаваемого прямолинейного движения. Установлено, что разработанный алгоритм управления обеспечивает задаваемое движение с достаточной для выполняемого вида работ точностью. Целесообразным представляется использование предлагаемого управления при выполнении полевых работ с дециметровой точностью.



**Рис. 3. Изменение управляющего угла слома рамы**



**Рис. 4. Зависимость бокового отклонения центра масс трактора от времени**



**Рис. 5. Зависимость бокового отклонения центра масс плуга от времени**

**Библиографический список**

1. Беспилотный электроагрегат для обработки сельскохозяйственных культур холодным туманом / А. В. Линенко, А. И. Азнагулов, Т. И. Камалов [и др.]. – Текст: непосредственный // Из-

вестия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2020 – № 5 (85). – С. 136-139. – EDN BCYPRP.

2. РСМ Агротроник Пилот 1.0 электроруль... И как быстро окупается система автоуправле-

ния. – URL: <https://blog.rostselmash.com/tekhnika-i-tekhologii/rsm-agrotronik-pilot-1-0-elektorul-i-kak-bystro-okupaetsya-sistema-avtovozhdeniya/> (дата обращения: 27.01.2024). – Текст: электронный.

3. Автопилот на комбайн. Беспилотный комбайн. – URL: <https://agrosturman.ru/blog/tpost/7c33j0psy1-avtopilot-na-kombain-bespilotnii-kombain> (дата обращения: 29.01.2024). – Текст: электронный.

4. Поддубный, В. И. Дорожные испытания электромеханической системы управления движением колесного трактора / В. И. Поддубный, А. С. Ненайденко, Р.Р. Байбасаров. – Текст: непосредственный // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 1. – С. 47-52.

5. Павлюк, А. С. Теоретические основы управляемого движения колесных машин / А. С. Павлюк, В. И. Поддубный, Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – 237 с. – Текст: непосредственный.

6. Поддубный, В. И. Разработка мехатронных моделей механических систем с использованием прикладного пакета CAMeL-View / В. И. Поддубный, А. С. Павлюк, М. Л. Поддубная. – Текст: непосредственный // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4/3. – С. 110-116.

7. Поддубный, В. И. Механико-математическая модель седельного тягача с двухосным полуприцепом / В. И. Поддубный, А. И. Валекжанин, М. Л. Поддубная. – Текст: непосредственный // Ползуновский вестник. – 2016. – № 1. – С. 43-47.

8. Нагорных, Е. М. Определение момента инерции шарнирно-соединенной машины / Е. М. Нагорных, В. И. Поддубный. – Текст: непосредственный // Наука и молодежь: сборник материалов / XVI Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова. – 2019. – С. 762-764.

9. Поддубный, В. И. Механико-математическая модель шины колесного трактора / В. И. Поддубный. – Текст: непосредственный // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2008. – № 1. – С. 222-227.

## References

1. Linenko, A.V. Беспилотный электроагрегат для обработки сельскохозяйственных культур холодным туманом / A.V. Linenko, A.I. Aznagulov, T.I. Kamalov [i dr.]. // Izvestiia Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2020. – No. 5 (85). – S. 136-139. – EDN BCYPRP.

2. RSM Agrotronik Pilot 1.0 elektorul... I kak bystro okupaetsia sistema avtoupavljeniia. – URL: <https://blog.rostselmash.com/tekhnika-i-tekhologii/rsm-agrotronik-pilot-1-0-elektorul-i-kak-bystro-okupaetsya-sistema-avtovozhdeniya/> (data obrashcheniia 27.01.2024).

3. Avtopilot na kombain. Bespilotnyi kombain. – URL: <https://agrosturman.ru/blog/tpost/7c33j0psy1-avtopilot-na-kombain-bespilotnii-kombain> (data obrashcheniia 29.01.2024).

4. Poddubnyi, V.I. Dorozhnye ispytaniia elektromekhanicheskoi sistmy upravleniia dvizheniem kolesnogo traktora / V.I. Poddubnyi, A.S. Nenaidenko, R.R. Baibasarov. // Traktory i selkhoz mashiny. – 2019. – No. 1. – S. 47-52.

5. Teoreticheskie osnovy upravliaemogo dvizheniia kolesnykh mashin / A.S. Pavliuk, V.I. Poddubnyi, Alt. gos. tekhn. un-t im. I.I. Polzunova. – Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2010. – 237 s.

6. Poddubnyi, V.I. Razrabotka mekhatronnykh modelei mekhanicheskikh sistem s ispolzovaniem prikladnogo paketa CAMeL-View / V.I. Poddubnyi, A.S. Pavliuk, M.L. Poddubnaia // Polzunovskii vestnik. – 2013. – No. 4/3. – S.110-116.

7. Poddubnyi, V.I. Mekhaniko-matematicheskaiia model sedelnogo tiagacha s dvukhosnym polupritsepom / V.I. Poddubnyi, A.I. Valekzhanin, M.L. Poddubnaia // Polzunovskii vestnik. – 2016. – No. 1. – S. 43-47.

8. Nagornykh, E.M. Opredelenie momenta inertsii sharnirno-soedinennoi mashiny / E.M. Nagornykh, V.I. Poddubnyi // Nauka i molodezh. Materialy XVI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniia Rossiiskoi Federatsii, Altaiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. I.I. Polzunova. 2019. – S. 762-764.

9. Poddubnyi, V.I. Mekhaniko-matematicheskaiia model shiny kolesnogo traktora / V.I. Poddubnyi. // Vestnik KrasGAU. Tekhnika. – 2008. – No. 1. – S. 222-227.

