

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНОГО МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА

MATHEMATICAL MODELING OF THE CONTROLLED MOTION OF THE WHEELED MACHINE-TRACTOR UNIT

В.И. ПОДДУБНЫЙ¹, д.т.н.

А.С. ПАВЛЮК¹, д.т.н.

М.Л. ПОДДУБНАЯ², к.ф.-м.н.

¹ Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

² Алтайский филиал ФГБОУ ВО «Российская академия
народного хозяйства и государственной службы
при президенте Российской Федерации», Барнаул,
Россия, poddubny@list.ru

V.I. PODDUBNYI¹, DSc in Engineering

A.S. PAVLYUK¹, DSc in Engineering

M.L. PODDUBNAYA², PhD in Physics and Mathematics

¹ Altai State Agrarian University, Barnaul, Russia

² Altai Branch of the Russian Academy of National Economy
and Public Administration, Barnaul, Russia, poddubny@list.ru

Приводится краткий обзор систем точного земледелия, сформулированы задачи научно-практических исследований для создания отечественной системы точного земледелия с использованием автопилотирования. Проведен анализ прикладного программного обеспечения, используемого при разработке и апробации алгоритмов управления движением колесных сельскохозяйственных машин. Представлена идеология разработки мехатронных систем с использованием прикладного пакета CAMEL-View, приведено описание механико-математической модели машинно-тракторного агрегата в составе колесного трактора и полунавесного плуга. Приведены результаты математического моделирования движения машинно-тракторного агрегата со скоростью 2,5 м/с с использованием управления на основе базисных маневров колесных машин при выполнении обработки почвы на глубину 0,24 м. Необходимый угол слома рамы трактора определяется как линейная комбинация зависимостей для изменения кривизны траектории, направления движения, поперечного перемещения и начального угла поворота управляемых колес. Анализ результатов позволяет сделать вывод о достаточно хорошем качестве рабочего движения пахотного агрегата, что свидетельствует о работоспособности предложенного алгоритма управления. Предполагается программная реализация алгоритма управления в разработанной с участием авторов электромеханической системе управления движением колесными сельскохозяйственными машинами, использующей спутниковые радионавигационные системы ГЛОНАСС и GPS. При реальном управлении движением колесной сельскохозяйственной машиной значительное ухудшение качества движения вызывается неточностью определения ее текущих координат при использовании спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС. Соответственно, уровень боковых отклонений рабочих органов сельхозмашины будет выше, чем полученные по результатам моделирования, использующего предложенный алгоритм управления. Окончательный вывод о границах применимости предложенного управления для различных полевых работ будет сделан по результатам полевых испытаний системы управления.

Ключевые слова: колесный машинно-тракторный агрегат, устойчивость и управляемость движения, точное земледелие, прикладное программное обеспечение, механико-математическая модель, математическое моделирование.

A brief review of the systems of precise farming is given, problems of scientific and practical research are formulated to create a domestic system of accurate farming using autopilotation. The analysis of applied software used in the development and approbation of algorithms for controlling the movement of wheeled agricultural machines is carried out. The ideology of the development of mechatronic systems using the CAMEL-View application package is presented, a mechanical-mathematical model of the machine-tractor unit consisting of a wheeled tractor and a semi-mounted plow is described. The results of mathematical modeling of the movement of a machine-tractor unit at a speed of 2.5 m / s are presented using control based on the basic maneuvers of wheeled vehicles when the soil is processed to a depth of 0.24 m. The required slope angle of the tractor frame is defined as a linear combination of dependencies for changing the curvature of the trajectory, the direction of motion, the lateral displacement and the initial angle of rotation of the steered wheels. The analysis of the results allows to draw a conclusion about the rather good quality of the working movement of the arable unit, which indicates the efficiency of the proposed control algorithm. The program implementation of the control algorithm is proposed in the wheeled agricultural machines developed with the participation of authors of the electromechanical control system for the movement using satellite radio navigation systems GLONASS and GPS. With a real control of the movement of a wheeled agricultural machine, a significant deterioration in the quality of motion is caused by inaccurate determination of its current coordinates when using satellite GPS and GLONASS radio navigation systems. Accordingly, the level of lateral deviations of the working mechanisms of the agricultural machine will be higher than the motion obtained from the modeling results, using the proposed control algorithm. The final conclusion about the limits of applicability of the proposed control for various fieldwork will be made based on the results of field tests of the control system.

Keywords: wheeled machine and tractor unit, stability and controllability of motion, precise agriculture, applied software, mechanical-mathematical model, mathematical modeling.

Введение

Важнейшей задачей сельскохозяйственного производства является обеспечение дальнейшего роста производительности труда на всех операциях по возделыванию сельскохозяйственных культур при сохранении высокого качества выполнения работ. Возмущения со стороны микрорельефа опорной поверхности, действие сил инерции при криволинейном движении, продольный и поперечный наклоны опорной поверхности вызывают отклонение колесных мобильных машин от задаваемого направления движения. При этом ухудшается качество почвообработки вследствие образования огрехов при междурядной обработке повреждаются растения, при опрыскивании гербицидами увеличивается их расход из-за перекрытия зон опыления, и происходит отравление растений при передозировке. Отклонение от задаваемой траектории движения вызывает увеличение пройденного пути, происходит образование клиньев в конце обработки поля.

Эффективность использования колесных машин может быть повышена путем улучшения их устойчивости и управляемости. Одним из наиболее эффективных средств повышения устойчивости и управляемости движения является разработка и внедрение систем точного земледелия [1], позволяющих осуществлять управление движением без участия водителя. На российском рынке широко представлены импортные системы точного земледелия компаний «Джон Дир», Trimble и других. Следует отметить, что в настоящее время на рынке отсутствуют отечественные системы точного земледелия с автопилотированием или подруливанием. Из отечественных систем следует отметить бортовой навигационный комплекс «Агронавигатор» производства ООО «ЛТЦ Аэросоюз», предназначенный для параллельного вождения автотранспортной техники при химической обработке полей и внесении удобрений в дневных и ночных условиях с точностью до 1 м [2]. Соответственно, проведение теоретических и экспериментальных исследований, ставящий целью создание отечественной системы точного земледелия, является актуальной задачей.

Цель исследования

Главным элементом системы является программно-аппаратный комплекс, управляющий движением колесной сельскохозяйственной

машиной по задаваемой траектории при выполнении полевых работ с использованием спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС.

Одним из наиболее важных этапов при разработке системы управления является разработка алгоритмов управления движением, программная и механическая реализация которых обеспечивают задаваемое движение колесной сельскохозяйственной машины.

В случае разработки алгоритма управления с использованием теории автоматического управления необходима математическая модель объекта управления в виде уравнений в пространстве состояний. Качество разработанного управления зависит от адекватности математической модели реальному объекту. Поэтому создание адекватной детализированной механико-математической модели колесного машинно-тракторного агрегата является очень важной задачей при разработке системы автоматического управления его движением. Следует отметить, что механико-математическая модель машинно-тракторного агрегата необходима также для оценки качества разработанного алгоритма управления.

Материалы и методы

Для составления дифференциальных уравнений движения системы с относительно небольшим числом степеней свободы традиционно используются уравнения Лагранжа 2 рода. При учете внутреннего взаимодействия между отдельными телами системы появляются дополнительные степени свободы и происходит существенное усложнение математического описания, увеличивается вероятность ошибки. Поэтому целесообразно для сложных механических систем использование прикладных программных продуктов, позволяющих на основе встроенного математического символического ядра генерировать дифференциальные уравнения движения, интегрировать их и визуализировать движение.

Такие возможности предоставляют специализированные пакеты Matlab-SimMechanik [3], CAMeL-View [4, 5], RecurDyn [6]. В зависимости от степени детализации и сложности разрабатываемой модели механической системы целесообразно применение одного из вышеперечисленных пакетов. В частности, применение CAMeL-View предпочтительнее при разработке и апробации алгоритмов управления

движением механической системы с использованием теории автоматического регулирования [7] при необходимости учитывать контактные взаимодействия тел системы между собой лучше применять RecurDyn.

Прикладной пакет CaMEL-View использует идеологию визуального объектно-ориентированного программирования и предназначен для создания моделей различных механических систем, их анализа и оптимизации. В пакете используются собственная библиотека объектов, позволяющая описывать отдельные тела системы, их механические связи между собой, производить математическое описание их взаимодействия. Механическая система представляется как совокупность отдельных тел RigidBody, соединяемых сочленениями Joint.

Для тела имеется возможность задавать массово-геометрические характеристики (массу, тензор инерции). Входами являются силы и моменты, приложенные в центре масс тела или портах (произвольных точках тела), выходами – линейное ускорение его центра масс в инерциальной системе отсчета, линейные и угловые скорости в различных системах отсчета, текущие координаты.

Сочленение Joint можно представить как пространственную пружину с задаваемыми жесткостью и демпфированием в направлениях осей X , Y , Z и угловыми жесткостью и демпфированием при угловых деформациях относительно осей. Сочленение может быть кинематическое и динамическое. При соединении тел кинематическим сочленением обеспечивается свободное (линейное или угловое) перемещение тел в желаемых направлениях. Таким образом, можно описать любые связи между телами. Силы взаимодействия тел в высвобождающемся направлении для кинематического Jointa описываются при помощи математического блока StateSpace. В случае использования динамического сочленения генерация сил упругого взаимодействия происходит автоматически с использованием задаваемых в блоке коэффициентов жесткости и демпфирования.

Механический блок AktuatorClass определяет относительные линейные и угловые перемещения и скорости двух тел, соединенных при помощи сочленений Joint, и позволяет вводить между ними силы и моменты внутреннего взаимодействия.

Математический блок StateSpace позволяет программировать с использованием объектно-

го языка программирования Objective-DSS, основой которого является язык Smalltalk, производить математические вычисления.

В состав библиотеки объектов входят также блоки таблиц, источники сигналов различной формы, цифровые фильтры, блоки регуляторов, передаточных функций и т.д. Применение библиотеки объектов позволяет создавать модели механических систем различной сложности с использованием элементов управления и регулирования. Встроенное в CaMEL символьное ядро позволяет по составленной из библиотечных модулей топологической схеме модели генерировать ее математическую модель, представляющую собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка в форме Коши. Пакет включает в себя также элементы линейного анализа (определение собственных значений системной матрицы), позволяющие получать фазовую и амплитудно-частотную характеристики системы и производить линеаризацию модели в заданной окрестности. Имеется возможность экспорта модели в MATLAB-Simulink в виде модельного файла для дальнейшего его использования при разработке системы управления и генерации си-кода для использования модели при лабораторных испытаниях в режиме реального времени.

С использованием библиотеки объектов CaMEL-View была разработана модель машинно-тракторного агрегата в составе колесного трактора и полунавесного плуга. Топология модели на верхнем уровне иерархии представлена на рисунке 1. Передняя часть трактора при помощи сочленения «подвес» соединяется с блоком «оси», моделирующей инерциальную систему отсчета, связанную с землей. Сочленение допускает перемещения трактора в направлениях трех осей пространства и поворот вокруг них. Задняя часть трактора соединяется с передней сочленением «Шарнир», допускающим их взаимный поворот относительно вертикальной и продольной осей. Полунавесной плуг ПТК-9-35 представлен механической подсистемой «плуг», соединенной блоком «Шарнир1» с задней секцией трактора.

Механическая подсистема «Управление» предназначена для генерации управляющего момента слома рамы трактора для обеспечения движения по задаваемой траектории. Генератор сигналов позволяет задавать различные виды траектории с использованием библиотеки сигналов. Основное назначение

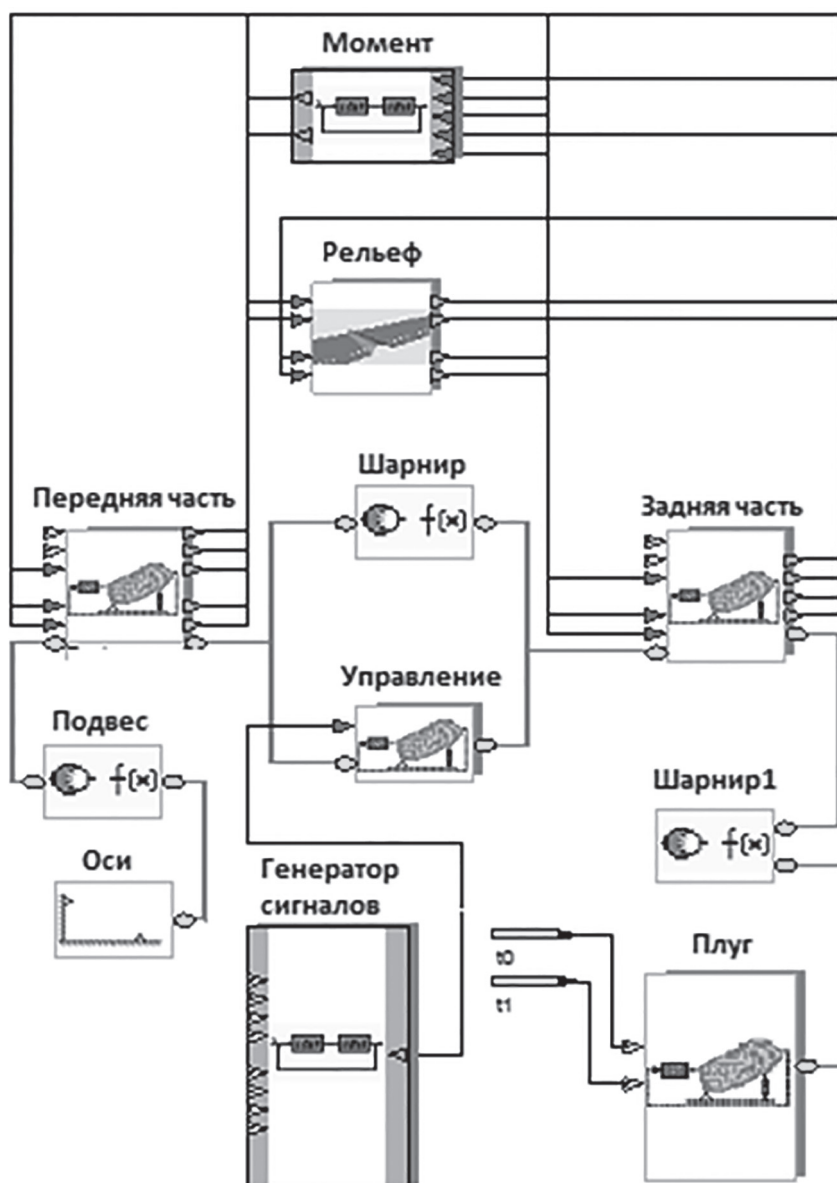


Рис. 1. Топология модели машинно-тракторного агрегата на верхнем уровне иерархии

подсистемы «Момент» – генерация крутящего момента на колесах трактора для обеспечения движения с задаваемой скоростью. Механическая подсистема «Рельеф» предназначена для описания микрорельефа опорной поверхности и определения вертикальных возмущений для колес трактора при его движении. Иерархия подсистем модели ввиду их сложности и трудности визуального восприятия не приводится. 3D-модель представлена на рисунке 2. Одним из наиболее важным элементом модели является математическая модель описания сил, действующих в контакте колеса с опорной поверхностью. Она должна «поставлять» в процессе моделирования силы и моменты на ободе колеса и учитывать возмущающее действие

со стороны опорной поверхности. Проекции сил и моментов на оси, связанные с ободом колеса, определяются по величине продольного и бокового скольжения колеса относительно опорной поверхности. Скольжения определяются по текущим значениям положения, ориентации, линейной и угловой скоростям обода колеса [8].

При описании микрорельефа опорной поверхности обрабатываемого поля за основу был принят микрорельеф квадрата со стороной 4 м, сформированный матлаб-функцией Peaks [3]. При формировании поля вертикальные координаты микрорельефа каждого квадрата умножались на соответствующую величину массива случайных величин, распределенных по

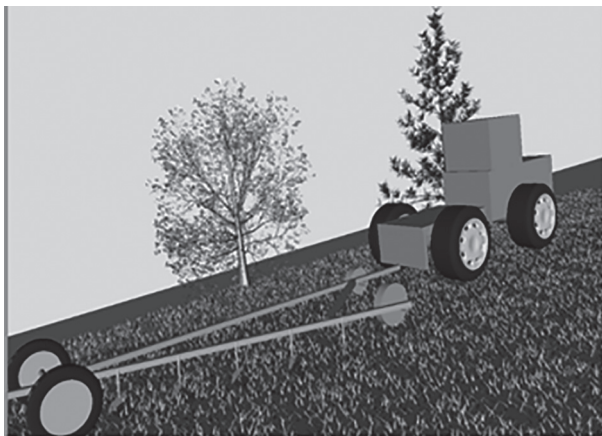


Рис. 2. 3D-модель машинно-тракторного агрегата

нормальному закону с математическим ожиданием 0 и среднеквадратичным отклонением 1, сформированного матлаб-функцией `randn`. Реализация полученного микрорельефа при скорости движения 2,5 м/с является эргодической стационарной случайной функцией со среднеквадратическим отклонением 0,025 м и основными частотами спектра до 1,5 Гц.

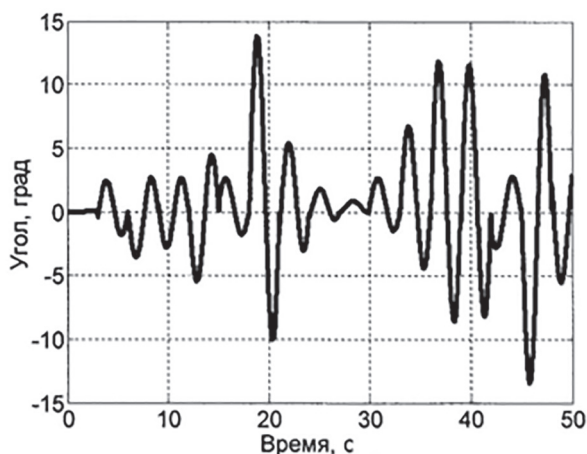


Рис. 3. Управляющий угол слома рамы трактора

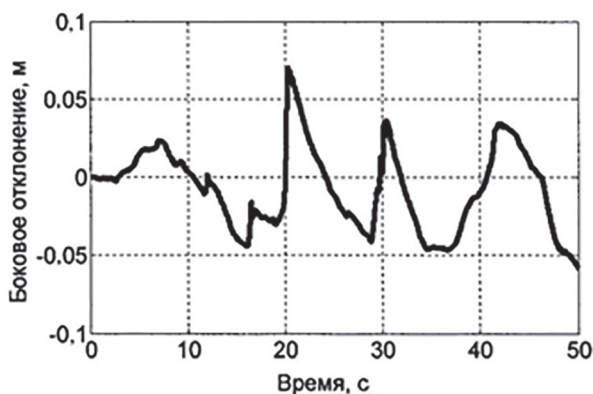


Рис. 4. Боковое отклонение центра масс плуга

Результаты и обсуждение

Для апробации алгоритма управления движением было проведено математическое моделирование движения машинно-тракторного агрегата со скоростью 2,5 м/с при глубине обработки 0,24 м. Необходимый угол слома рамы трактора определяется как линейная комбинация зависимостей для изменения кривизны траектории, направления движения, поперечного перемещения и начального угла поворота управляемых колес [9]. На рисунке 3 представлен закон изменения угла слома рамы для поддержания прямолинейного движения. Боковые отклонения центра масс плуга не превышают 0,08 м (рис. 4).

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно хорошем качестве рабочего движения пахотного агрегата, что свидетельствует о работоспособности предложенного алгоритма управления. При реальном управлении движением колесной сельскохозяйственной машиной значительное ухудшение качества движения вызывается неточностью определения ее текущих координат при использовании спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС. Соответственно, уровень боковых отклонений рабочих органов сельхозмашины будет выше, чем полученные по результатам моделирования, соответствующего предложенному алгоритму управления. Окончательный вывод о возможности применения предложенного управления для различных полевых работ будет сделан по результатам полевых испытаний. Перспективным представляется разработка и апробация управления с использованием теории автоматического регулирования.

Литература

1. Березовский Е., Захаренко А., Полин В. Внедрение технологий точного земледелия: опыт Тимирязевской академии // *Аграрное обозрение*. 2009. № 4. С. 12–17.
2. Бортовой навигационный комплекс «Агронавигатор» // URL: <http://xn---etboasgceckhfu.xn--p1ai/catalog/oborudovanie-dlya-selhoztehnik/sistema-parallelnogo-vozhdeniya-agronavigator> (дата обращения: 22.12.2016).
3. Дьяконов В.П. *Матлаб 6.5+Simulink 4/5*. М.: СОЛОН-Пресс, 2002. 768 с.

4. Поддубный В.И., Павлюк А.С., Поддубная М.Л. Разработка мехатронных моделей механических систем с использованием прикладного пакета CAMeL-View // Ползуновский вестник. 2013. № 4/3. С. 110–116.
5. Поддубный, В.И., Валекжанин А.И., Поддубная М.Л. Механико-математическая модель седельного тягача с двухосным полуприцепом // Ползуновский вестник. 2016. № 1. С. 43–47.
6. Поддубный, В.И., Поддубная М.Л. Разработка математических моделей механических систем с использованием прикладного пакета RecurDyn // Ползуновский вестник. 2015. № 1. С. 56–60.
7. Перепелкин Е. А., Поддубный В.И., Варкентин А., Ган М. Применение прикладного пакета CAMeL-View для моделирования управляемого движения колесного трактора // Информационные технологии. 2010. № 7. С. 24–30.
8. Поддубный В.И. Механико-математическая модель шины колесного трактора // Вестник КрасГАУ. Техника. 2008. № 1. С. 222–227.
9. Павлюк А.С., Поддубный В.И. Теоретические основы управляемого движения колесных машин. Барнаул: Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова, 2010. 239 с.
2. Bortovoy navigatsionnyy kompleks «Agronavigator». URL: <http://xn--ctboasgcccckhfu.xn--p1ai/catalog/oborudovanie-dlya-selhoztekhniki/sistema-parallel-nogo-vozhdeniya-agronavigator> (data obrashcheniya: 22.12.2016).
3. D'yakonov V.P. Matlab 6.5+Simulink 4/5. Moscow: SOLON-Press Publ., 2002. 768 p.
4. Poddubnyy V.I., Pavlyuk A.S., Poddubnaya M.L. Development of mechatronic models of mechanical systems using the CAMeL-View application package. Polzunovskiy vestnik. 2013. No 4/3, pp. 110–116 (in Russ.).
5. Poddubnyy, V.I., Valekzhanin A.I., Poddubnaya M.L. Mechanics and mathematical model of two-axle truck tractor with semitrailer. Polzunovskiy vestnik. 2016. No 1, pp. 43–47 (in Russ.).
6. Poddubnyy, V.I., Poddubnaya M.L. Development of mathematical models of mechanical systems using the RecurDyn application package. Polzunovskiy vestnik. 2015. No 1, pp. 56–60 (in Russ.).
7. Perepelkin E. A., Poddubnyy V.I., Varkentin A., Gan M. Application of the CAMeL-View application package for modeling the controlled movement of the wheeled tractor. Informatsionnye tekhnologii. 2010. No 7, pp. 24–30 (in Russ.).
8. Poddubnyy V.I. Mechanic-mathematical model of the tire of the wheeled tractor. Vestnik KrasGAU. Tekhnika. 2008. No 1, pp. 222–227 (in Russ.).
9. Pavlyuk A.S., Poddubnyy V.I. Teoreticheskie osnovy upravlyаемого dvizheniya kolesnykh mashin [Theoretical basis of controlled movement of wheeled vehicles]. Barnaul: Alt. gos. tekhn. un-t im. I.I. Polzunova Publ., 2010. 239 p.

References

1. Berezovskiy E., Zakharenko A., Polin V. Introduction of technologies of exact agriculture: the experience of the Timiryazev Academy. Agrarnoe obozrenie. 2009. No 4, pp. 12–17 (in Russ.).