

УДК 519.17

## СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МАШИНО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

*Азимов Б.М.<sup>1</sup>, + Якубжанова Д.К.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> НИИ развития цифровых технологий и искусственного интеллекта,  
Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup> Самаркандский филиал Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми, Самарканд, Узбекистан

+ yakubjanova55575@gmail.com

**Аннотация.** В статье обобщены современные литературные данные, отражающие подходы и концепции к разработке научно обоснованных методов исследования динамических режимов движения машино-тракторных агрегатов. Рассматривается необходимость перехода от квазистатических и частных экспериментальных моделей к многоуровневым структурам моделирования, способным учитывать комплексное воздействие внутренних и внешних факторов на поведение агрегата. Особое внимание уделяется вопросам устойчивости и управляемости движения, а также повышению энергетической и агротехнической эффективности функционирования хлопкоуборочных машин при эксплуатации в различных условиях. Обоснованы направления оптимизации параметров движения и управления с применением интеллектуальных и прогнозирующих систем. Представленные результаты формируют методологическую базу для последующей разработки цифровых моделей и систем автоматизированного управления сельскохозяйственными агрегатами.

**Ключевые слова:** хлопкоуборочная машина, динамические режимы движения, устойчивость, управляемость, моделирование, многоуровневая структура, агротехнические требования, управление.

### 1 ВВЕДЕНИЕ

Хлопкоуборочная машина (ХУМ) представляет собой управляемую динамическую систему, эффективность функционирования которой существенно зависит от условий движения по различным траекториям и воздействующих факторов. От уровня технического совершенства ХУМ во многом зависят особенности работы центральной управляющей установки и степень соответствия машины своему функциональному назначению.

В современных условиях дальнейшее расширение технологических возможностей хлопкоуборочных машин и сфер их применения требует всестороннего и углублённого изучения процессов их передвижения и функционирования как единой динамической системы.

Наблюдаемые тенденции в сельскохозяйственном машиностроении указывают на увеличение сложности динамики ХУМ. Это обусловлено расширением состава узлов и механизмов машины, возрастанием числа внешних и управляющих воздействий, увеличением мощности машин и использованием энергетических ресурсов двигателя не только для обеспечения движения, но и для приведения в действие рабочих органов.

Такие изменения обуславливают необходимость более точного анализа и эффективного управления движением ХУМ с целью соблюдения агротехнических требований, повышения эффективности эксплуатации и снижения ресурсоёмкости.

В настоящее время практика оценки движения ХУМ в основном сводится к анализу устойчивости и управляемости, при этом многие важные аспекты динамического поведения машины остаются недостаточно изученными. Как правило, исследования ограничиваются отдельными узлами агрегата, анализом их массогабаритных параметров и режимов работы без комплексного учёта взаимодействия всех элементов системы.

Многие существующие методы основаны на квазистатических расчетах, что не позволяет в полной мере учитывать реальные динамические процессы при движении машины. Экспериментальные методы, в свою очередь, не обеспечивают получения всего необходимого объёма данных о поведении агрегатов в условиях эксплуатации.

В этой связи одной из актуальных научно-практических задач является разработка новых методов и инструментальных средств, позволяющих обоснованно выбирать параметры движения ХУМ. Основная цель таких разработок – обеспечение стабильности и управляемости, повышение энергетической эффективности, снижение ресурсо-ёмкости, а также рациональное использование энергетического потенциала агрегата.

Перспективным направлением в решении указанных задач является построение многоуровневой структуры моделирования, охватывающей динамические режимы работы и оптимальное управление ХУМ в процессе диагностики и эксплуатации в различных условиях и по различным траекториям. Такая структура позволяет учитывать широкий спектр внешних и внутренних факторов, влияющих на поведение машины, а также разрабатывать адаптивные алгоритмы управления в реальном времени.

Реализация данного подхода создаёт научно-техническую основу для повышения надёжности и производительности хлопкоуборочных машин, а также способствует интеграции современных цифровых и интеллектуальных технологий в аграрный сектор.

**Цель работы:** обобщить имеющиеся литературные данные о современных концепциях разработки научно обоснованных подходов и методов исследования динамических режимов движения хлопкоуборочной машины с учётом многофакторного влияния внешних и внутренних воздействий, направленных на повышение устойчивости, управляемости и общей эффективности функционирования ХУМ при эксплуатации в различных условиях.

## 2 ИССЛЕДОВАНИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ И УПРАВЛЕНИЯ ХУМ КАК ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Анализ существующих методов оценки движения хлопкоуборочной машины (ХУМ) как динамической системы показывает, что в большинстве случаев применяется упрощённый подход, основанный на квазистатических моделях. Такие методы предполагают рассмотрение машины в установившихся режимах работы, не учитывая временные характеристики и переходные процессы, происходящие при изменении условий движения. Основное внимание при этом уделяется устойчивости и управляемости только отдельных элементов или агрегатов машины, в то время как взаимодействие всех подсистем в рамках единой динамической структуры остаётся вне поля анализа.

Кроме того, в практике инженерных расчётов часто используются эмпирические зависимости и таблицы, полученные на основе ограниченных экспериментальных данных, что снижает точность прогнозирования поведения ХУМ в сложных эксплуатационных условиях. Экспериментальные методы исследования движения ХУМ, как правило, ограничены возможностями полевых испытаний, требуют значительных затрат времени и ресурсов, а также не позволяют получить исчерпывающую информацию о внутренних процессах, происходящих в системе.

Также отмечается отсутствие комплексных подходов, которые учитывали бы влияние изменяющихся внешних факторов и внутренних параметров на динамику машины. Это приводит к необходимости разработки более точных и универсальных моделей, способных описывать поведение ХУМ в реальном времени и адаптироваться к изменяющимся условиям работы.

Таким образом, существующие методы оценки движения ХУМ обладают рядом ограничений, что обуславливает актуальность создания более совершенных, многоуровневых моделей и алгоритмов оптимального управления, обеспечивающих повышение эффективности и надёжности работы хлопкоуборочной техники. Рассмотрим обзор современные концепции разработки научно обоснованных подходов и методов исследования динамических режимов движения машино-тракторных агрегатов.

Целью исследования [1] является определение степени влияния предлагаемой схемы агрегата и его конструктивных параметров на устойчивость движения в горизонтальной плоскости.

Теоретический анализ проводился с использованием амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик, полученных на основе разработанной математической модели движения модульного агрегата при воздействии возмущений. В качестве последнего принималась разность тяговых сопротивлений боковых культиваторов агрегата. В результате установлено, что блокировка вертикального шарнира ТМ существенно повышает устойчивость движения агрегата.

Подход, предложенный в работе [2] позволяет сократить затраты труда и времени на моделирование движения многоэлементных мобильных машин в пространстве при изменении их структур. Данная методология построения математической модели позволяет с минимальными затратами ресурсов вносить изменения в математический аппарат исследуемого процесса. При изменении структуры исследуемой многоэлементной мобильной машины изменяются только уравнения связи, что позволяет сократить затраты на разработку математической модели.

Формирование кинематических связей многоэлементного машинно-тракторного агрегата на примере посевного агрегата позволяет исследовать пространственную динамику машины. Кинематические связи необходимые для моделирования движения агрегата разделены на структурные части, не зависящие друг от друга. Перестановка элементов местам не влияет на математическую модель динамики в целом. Методология позволяет исследовать различные типы связей между элементами мобильных машин. В случае изучения движения многоэлементного посевного сельскохозяйственного агрегата упрощаются исследования влияния компоновочных схем на динамику его функционирования.

Кравченко И.В. и др. в исследовании [3] предложили математическую модель МТА на базе мобильного энергетического средства с гидростатической трансмиссией, с помощью которой можно осуществить аналитический расчёт основных показателей машинно-тракторного агрегата. Доказано, что внедрение математической модели упрощает и облегчает расчёты эксплуатационных показателей машинно-тракторных агрегатов. Работа [4] посвящена представлению этапов 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 ТЗ-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 реального времени на экспериментальном стенде при отладке разрабатываемого электромеханического подруливающего устройства. В работе [5] рассматриваются методы построения математических моделей силовых передач машинных агрегатов с активными и пассивными рабочими органами в виде многомассовых колебательных систем, нахождение их динамических характеристик и методы оптимизации динамических свойств. Предложенные методы рассмотрены на примерах динамических моделей силовых передач машинно-тракторных агрегатов промышленного и сельскохозяйственного назначения.

Группой ученых из Украины и Словакии в [6] рассмотрены возможности исследования динамической устойчивости МТА методами многократной динамики (ММД). Для этого использовался виртуальный стенд, созданный в среде CAD SolidWorks и CAE-приложении SolidWorks Motion. На нем моделировалось движение МТА на базе трактора МТЗ-82.1, оснащенного навесными модульными орудиями. Поверхность движения включала четыре типа препятствий, расположенных на отдельных участках последовательно. Для анализа стадий движения МТА использовался параметр высоты подъема геометрического центра каждого из колес над опорной поверхностью и факт опрокидывания агрегата. Он показал, что преодоление одиночного линейного, одиночного последовательного и группового линейного препятствий при скорости 3,22 м/с происходит без потери устойчивости. Для исследования динамики многоэлементных машин, как правило, используются уравнения Лагранжа второго рода [7, 8]. В работе [9] предложен подход к анализу движения мобильной машины с полуприцепом на основе уравнений Лагранжа первого рода. Математическое моделирование движения одиночной машины было предметом многочисленных исследований [10–12], в которых также подробно рассматривались вопросы динамики и устойчивости подобных систем [13–16]. В исследованиях [17–21] сельскохозяйственные машины и агрегаты моделировались в виде одно-, двух- и трёхмассовых механических систем.

Следует отметить, что во всех указанных работах математические модели многоэлементных машин строятся как жёстко связанные, целостные системы. Это приводит к необходимости полной переработки модели при любом изменении внутренней структуры или связей, что значительно увеличивает трудоёмкость и временные затраты на проведение анализа [22]. Кроме того, установлено, что при числе элементов более двух и ненулевом расстоянии от задней оси мобильной машины до точки прицепа уравнения Лагранжа второго рода не имеют допустимого решения [23].

Исходя из этого, для корректного описания динамики неголономных механических систем требуется формулировка основных уравнений динамики с предварительным обоснованием уравнений связи. Такой подход был успешно реализован, например, в работе [24], где рассматривалось плоскопараллельное движение машинно-тракторного агрегата.

### **3 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ХУМ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

С учётом сложной кинематической и конструктивной структуры хлопкоуборочной машины (ХУМ), а также влияния множества внутренних и внешних факторов на её движение, становится очевидной необходимость разработки более совершенных методов моделирования, способных учитывать многокомпонентную природу объекта. Применение традиционных одномерных или квазистатических моделей не позволяет в полной мере отразить реальное поведение ХУМ как управляемой динамической системы. Это особенно актуально при движении по траекториям с переменной

кривизной, изменяющимися нагрузками и неоднородными внешними условиями (состояние почвы, влажность, уклон поля и др.).

Многоуровневая структура моделирования обеспечивает иерархическое представление взаимодействий на разных уровнях: от базовой кинематики и динамики отдельных узлов (например, ходовой части или исполнительных органов) до комплексной системы управления агрегатом в целом. Такой подход позволяет раздельно, но взаимосвязанно анализировать поведение различных подсистем, учитывать обратные связи между ними, а также эффективно внедрять адаптивные или интеллектуальные алгоритмы управления.

Кроме того, многоуровневая модель даёт возможность проводить симуляции в условиях, приближённых к реальным, и формировать цифровые двойники ХУМ, способные предсказывать поведение машины в различных эксплуатационных сценариях. Это, в свою очередь, создаёт основу для разработки систем автоматизированного или полуавтоматического управления, улучшения энергоэффективности, ресурсоёмкости и повышения точности выполнения агротехнических требований.

Таким образом, построение многоуровневой структуры моделирования является необходимым условием для перехода от эмпирических методов к научно обоснованным подходам в исследовании, диагностике и управлении движением ХУМ.

С целью повышения общей эффективности функционирования хлопкоуборочной машины (ХУМ) как динамической системы необходимо определить приоритетные направления оптимизации параметров её движения и управления.

Во-первых, особое внимание должно быть уделено **снижению удельного расхода энергии** за счёт рационального распределения мощности между движением агрегата и приводами рабочих органов. Это возможно при адаптивной настройке частоты вращения двигателя, скорости движения и глубины захвата с учётом конкретных условий поля и загрузки.

Во-вторых, необходимо обеспечивать **строгое соблюдение агротехнических требований**, включая точность следования заданной траектории, постоянство рабочей глубины и равномерность обработки участка. Это требует применения **систем навигационного и траекторного управления** с обратной связью, способных компенсировать влияние внешних возмущений.

Важным направлением является также **оптимизация динамических режимов движения**, включая сглаживание переходных процессов, минимизацию рывков и вибраций, которые не только влияют на износ агрегата, но и ухудшают качество выполнения технологического процесса. Для этого предлагается внедрение модулей прогнозирующего **управления** с использованием пространственно-временных моделей, позволяющих прогнозировать состояние машины на нескольких шагах вперёд.

Дополнительно, при проектировании систем управления следует учитывать **возможность интеллектуального выбора режимов работы** в зависимости от текущей производственной задачи, климатических и почвенных условий. Реализация указанных направлений обеспечит **энергоэффективную, стабильную и агротехнически обоснованную работу ХУМ**, способствуя повышению её производительности и надёжности в полевых условиях.

## 4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого анализа обобщены современные подходы к исследованию динамических режимов движения хлопкоуборочной машины (ХУМ) с учётом сложной структуры агрегата и многофакторного влияния внешней среды. Установлено, что существующие квазистатические и экспериментальные методы оценки движения ХУМ имеют ограниченную применимость и не в полной мере отражают реальные условия эксплуатации. Это обуславливает необходимость перехода к более комплексным, многоуровневым моделям, способным обеспечить адекватное описание взаимодействий между подсистемами и учитывать изменяющиеся динамические параметры в пространстве и времени.

Обоснована целесообразность построения иерархической структуры моделирования, охватывающей уровни от локальной кинематики узлов до глобального управления движением агрегата в целом. Такой подход позволяет сформировать теоретическую и практическую базу для разработки адаптивных, прогнозирующих и интеллектуальных систем управления, направленных на повышение устойчивости, точности следования заданной траектории, энергоэффективности и соответствие агротехническим требованиям.

Выделены ключевые направления оптимизации: снижение энергетических затрат за счёт рационального распределения мощности, повышение качества управления движением посредством внедрения навигационных систем с обратной связью, а также разработка режимов работы, адаптированных к конкретным условиям поля.

Таким образом, формирование научно обоснованных подходов к моделированию и управлению ХУМ является необходимым шагом к созданию более эффективных, надёжных и технологичных систем, обеспечивающих стабильную работу сельскохозяйственных машин в условиях растущей сложности производственных задач.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Nadykto V., Golub G., Tsyvenkova, N., Kyurchev V., Skliar O., Skliar R., Golub V. Shubenko V.* Modeling Movement Stability of Machine-Tractor Units Based on Modular Type Tractor. Appl. Sci. 2025,15, 2822. <https://doi.org/10.3390/app15052822>.
- [2] *Антощенко Р., Лебедев А., Толстолицкий В.* К определению кинематических связей, углов и скоростей колёс пространственной математической модели движения многоэлементного машинно-тракторного агрегата// MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2015. Vol.17. No.7. 11-16.
- [3] *Кравченко В.А., Стулин В.А.* Математическая модель машинно-тракторного агрегата на базе трактора с гидростатической трансмиссией // Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование, 4(36), 2016, стр 43-54.
- [4] *Ненайденко А.С., Поддубный В.И.* Математическое моделирование движения машинно-тракторного агрегата в горизонтальной плоскости// Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 7 (213), 2022, стр 108-116.
- [5] *Чекаев А., Свитачев А., Орловский С.* Моделирование и совершенствование динамических характеристик силовых передач машинных агрегатов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – С. 18–22.
- [6] *Bulgakov V., Kuvachov V., Nozdrovicky L., Findura P., Smolinskyi S., Ihnatiev Y.* The Study of Movement of the Wide Span Tractor-Based Field Machine Unit with Power Method of its Control// Acta Technologica Agriculturae. Volume 21 (2018): Issue 4, Pp. 160-165.
- [7] *Laceklis-Bertmanis J. and Kronbergs E.* 1996. Mathematical model of tractor aggregate / ASAE, St. Joseph, MI. 431-442.
- [8] *Liljedahl J.B., Turnquist P.K., Smith D.W. and Hoki M.* 1996. Tractors and Their Power Units /ASAE, St. Joseph, MI. 345-361.
- [9] *Chieh C.* Dynamic modeling of articulated vehicles for automated highway systems / In Proceedings of the American Control Conference, Seattle, USA. 1995, 653-657.
- [10] *Антощенко Р.В.* К исследованию нелинейной математической модели движения многоэлементных мобильных машин / Motrol. –2014, Т.16, №7. 77-83.
- [11] *Лихвенко С.П.* Математическая модель для расчётов распределения ведущих моментов и поэлементной буксования полноприводных тракторов / Повышение надёжности восстанавливаемых деталей машин: Вестник ХГТУСХ, 2001, Вып 8. Т. 2. 83-86.
- [12] *Ловейкин В.С., Бортун В.* Уточнённая математическая модель динамики движения ковшового элеватора / Motrol. Т.2012. 14, №3. 87-95.
- [13] *Рославцев А.В., Абдула С.Л.* Результаты исследования движения МТА / Тракторы и сельхозмашины. 1999, № 10. 14-18.
- [14] *Шуляк М.Л.* Эффективность эксплуатации трактора в агрегате с машиной переменной массы / Сборник научных трудов по материалам Международной научно-технической конференции «Обеспечение экологической безопасности путём создания наукоемких технических средств и технологий в лесном комплексе». Воронеж: ВГЛТА. 2015, №. 2. ч. 1. 15-19.
- [15] *Смирнов Г.А.* Теория движения колесных машин. 1990, 352.
- [16] *Вейц В.Л., Кочура А.Е.* Динамика машинных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания. 1976, 384.
- [17] *Антощенко Р.В.* Теоретические исследования движения почвообрабатывающего посевного агрегата при дифференциации массы технологической ёмкости / Механизация сельскохозяйственного производства: Вестник ХНТУСХ. 2013, Вып. 135. 158-162.
- [18] *Гячев Л.В.* Устойчивость движения сельскохозяйственных машин и агрегатов. 1985, 206.
- [19] *Legecuis T., Bourassa P., Laneville A.* On the extension of the gratzmuller critical velocity for locked steering road vehicle to the case of piloted vehicles / Vehicle system dynamics. 1985, №14. 615-622.
- [20] *De Luca.* Modelling and control of nonholonomic mechanical systems / Kinematics and Dynamics of Multi-Body Systems. Springer Verlag.1995, 301-305.

- [21] Антощенко Р.В. Теоретические исследования динамической модели колесного трактора класса 30КН / Motrol. 2013. Т. 15. №7. 171-176.
- [22] Антощенко Р.В., Тищенко Л.Н., Андреев Ю.М. К построению уравнений динамики многоэлементного машинно-тракторного агрегата / Вибрации в технике и технологиях. Винница. 2015, №3(79). 69-79.
- [23] Антощенко Р.В. К построению математической модели движения многоэлементных мобильных машин и обоснованию связей между ними / Труды Таврического государственного агротехнологического университета. 2014, Вып. 14. Т. 3. 282-288.
- [24] Андреев Ю.М. Численно-аналитическое решение обратной задачи динамики дискретных систем / Восточно-европейский журнал передовых технологий. № 2/4 (26), 2007. 10–13.

Поступила в редакцию 25.04.2025

**Цитирование:** Азимов Б.М., Якубжанова Д.К. (2025). Современные концепции моделирования и управления движением машино-тракторных агрегатов. *Международный журнал теоретических и прикладных вопросов цифровых технологий*, 8(3), –С. 23-28. <https://doi.org/10.62132/ijdt.v8i3.282>.

## MODERN CONCEPTS OF MODELING AND MOTION CONTROL OF MACHINE AND TRACTOR UNITS

*Azimov B.M.<sup>1</sup>, + Yakubjanova D.K.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Digital technologies and artificial intelligence development research institute,  
Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>Samarkand branch of the Tashkent university of information technologies named after  
Muhammad al-Khwarizmi, Samarkand, Uzbekistan

+ yakubjanova55575@gmail.com

**Abstract.** The article summarizes current literature data reflecting approaches and concepts for the development of scientifically grounded methods for studying the dynamic operating modes of cotton harvesters (CH). It highlights the need to transition from quasi-static and isolated experimental models to multi-level modeling structures capable of accounting for the complex influence of internal and external factors on the machine's behavior. Particular attention is given to issues of stability and controllability of movement, as well as to improving the energy and agrotechnical efficiency of CH operation under various conditions. Directions for optimizing movement and control parameters using intelligent and predictive systems are substantiated. The presented results form a methodological foundation for the further development of digital models and automated control systems for agricultural machinery.

**Keywords:** cotton harvester, dynamic operating modes, stability, controllability, modeling, multi-level structure, agrotechnical requirements, control.