

Автореферат, как произведение науки, является объектом авторского права.

Запрещается размещать данный автореферат или его фрагменты в интернете без разрешения автора. Без согласия автора Вы не имеете права распространять мою работу ни платно, ни бесплатно. Допускается размещение ссылки на страницу скачивания работы на сайте автора.

Образовательным учреждениям позволяется использовать содержание данной работы в рамках своей внутренней научной деятельности и исследований (в том числе и для публикации) с обязательной ссылкой на данную работу. Однако, образовательное учреждение не имеет права на издание, распространение, тиражирование или коммерческое использование работы без разрешения автора.

Краткое цитирование в научных работах допускается, если Вам необходимо подтвердить высказывание, и, если верно указан источник на данную работу.

Цитирование больших отрывков, таблиц или графиков и т.д. запрещено.

Автореферат издан на правах рукописи.

Алейников Ю.Г.

Алейников Юрий Георгиевич

**Обоснование параметров и режимов
движения роботизированной машины**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

Автореферат на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина» (ФГБОУ ВПО МГАУ).

Научный руководитель доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАСХН,
Дидманидзе Отари Назирович

Официальные оппоненты: **Ильюхин Михаил Степанович**,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
агроинженерный университет имени
В. П. Горячкина», профессор кафедры
«теплотехника»

Загарин Денис Александрович,
кандидат технических наук. доцент, руководи-
тель научно-исследовательского центра по испы-
танию авто- и мототехники ФГУП «НАМИ»,

Ведущая организация ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский
институт механизации сельского хозяйства»
(ГНУ ВИМ)

Защита диссертации состоится 15 апреля в 16.00 часов на заседании диссер-
тационного совета Д. 220.044.01 при ФГБОУ ВПО «Московский государственный
агроинженерный университет имени В.П. Горячкина» по адресу: 127550, Москва,
ул. Лиственничная аллея, д. 16-а, корпус 3, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Москов-
ский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина».

Автореферат разослан «15» марта 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.С. Дорохов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из эффективных высокотехнологичных направлений развития сельского хозяйства является применение роботизированных систем для производства продукции растениеводства и животноводства. Эффективность роботизированных систем для производства продукции сельского хозяйства заключается не только в известных преимуществах автоматизации индустриального производства, но и в достижении технологического эффекта путем создания наиболее благоприятных условий для биологических объектов в растениеводстве и животноводстве. Специфика размещения растений в условиях защищенного грунта и условий их выращивания, зачастую, не дает возможности полноценно использовать ручной труд, а в ряде случаев присутствие человека в теплице подвергает опасности выращиваемые растения из-за вероятности бактериального и грибкового заражения. Снизить вероятность ухудшения качества урожая из-за болезней растений можно за счет своевременного выявления очагов поражения и оперативного их устранения на ранней стадии при помощи роботизированных машин. Жители деревень, фермеры, колхозники и дачники каждый год вынуждены производить массу рутинных действий по обработке земли, посадке, прополке и сбору урожая. Многие действия довольно примитивны и повторяемы, то есть идеально подходят для автоматизации. В производственных условиях малых форм хозяйств становится целесообразно применять маленьких роботов, способных выполнять значительную часть сельскохозяйственных работ. В данной работе рассмотрена машина с дискретным взаимодействием с почвой. По сравнению с колесными или гусеничными транспортными средствами машины с дискретным колееобразованием наносят вред растениям значительно меньше. Кроме того, шагающие машины, благодаря маневренности их опор, способны передвигаться по крутым склонам и использовать опоры в качестве орудия труда.

Цель работы – обоснование параметров и режимов движения роботизированной машины с дискретным колееобразованием.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи исследования:

1. Анализ научных предпосылок и тенденций развития электромеханических средств с дискретным колееобразованием.
2. Разработка математической модели движения электромеханического средства с дискретным колееобразованием со стабилизацией движения по неровной поверхности.
3. Разработка модели электромеханического средства с дискретным колееобразованием со стабилизацией движения по неровной поверхности.
4. Оценка экономической эффективности созданных электромеханических и программных средств.

Объекты исследования: модель электромеханического средства с дискретным колееобразованием.

Методы исследования Решение поставленных задач проведено с использованием системного и математического анализа, математической статистики, дифференциального и интегрального исчисления, математического моделирования, программирования с применением средств микропроцессорной и компьютерной

техники. Используемые программы: AVR Studio 4, Apple Xcode 4.6, Microsoft Office Excel 2011, Компас 3D v.11.

Научная новизна заключается в теоретическом обосновании способа передвижения шагающей машины по неровной поверхности и разработке аппаратно-программных средств для автоматического движения шагающей машины со стабилизацией движения по неровной и наклонной поверхности.

Практическая ценность. Разработано новое электротехническое средство с дискретным колееобразованием со стабилизацией движения. А также программные средства позволяющие моделировать и анализировать движение по неровной поверхности.

Реализация результатов работы. Результаты проведенных исследований используются в учебном процессе МГАУ имени В.П. Горячкина.

На защиту выносятся:

- методика определения параметров и режимов движения шагающей машины.
- алгоритмы движения механического средства с дискретным колееобразованием со стабилизацией движения и без;
- математическая модель движения электромеханического средства с дискретным колееобразованием;
- комплект электротехнических и программных средств.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на: международной научно-практической конференции посвященной 80-летию ФГОУ ВПО МГАУ «Научные проблемы автомобильного транспорта» (г. Москва, 20-21 мая 2010 года); первой всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса» (г. Магадан, Северо-восточный Государственный Университет, 29-30 ноября 2010); международной научно-практической конференции «Научные проблемы эффективного использования тягово-транспортных средств в сельском хозяйстве» (Москва, МГАУ, 12-13 мая 2011 года), 10-й международной научно-практической конференции «Прогрессивные технологии в транспортных системах» (г. Оренбург, ОГУ, 25-27 октября 2011 года); Международной научно-практической конференции «Научные проблемы эффективного использования тягово-транспортных средств в сельском хозяйстве» (Москва, МГАУ, 20-22 февраля 2012 года); Международной научно-практической конференции «Инновационные агроинженерные технологии в сельском хозяйстве» (Москва, МГАУ, 8-9 ноября 2012 года); Международный форум «Открытые инновации» (Москва, Экспоцентр, 29 октября – 1 ноября 2012).

Публикации.

Основные теоретические положения и результаты исследования опубликованы в 8 научных работах, в том числе 3 в журналах рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы из 118 наименований, изложена на 132 страницах, включая 79 рисунков и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, представлена общая характеристика работы и научные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 «Состояние вопроса и задачи исследования» приведен обзор роботизированных машин для сельского хозяйства. Современные тенденции развития сельскохозяйственного производства в условиях жесткой конкуренции требуют минимизации расходов на производство единицы продукции. Наглядно показаны тенденции внедрения роботизированных систем в производство продуктов растениеводства и животноводства. Рассмотрены машины с колесным, гусеничным и шагающим движителем.

Одним из определяющих направлений исследования является разработка комплекса технологических мероприятий по внедрению ресурсосберегающих технологий и технических средств, обеспечивающих снижение потребности в материально-технических и энергоресурсах. Сохранностью плодородия почв занималось значительное число ученых НИИ и вузов страны (ВИМ, ВНИПТИМЭСХ, МГАУ, Санкт-Петербургский ГАУ, ВГТУ и др.). Основополагающий вклад в решения задач методического, технологического и организационного характера внесен отечественными учеными Г.В. Веденяпиным, О.Н. Дидманидзе, Д.А. Загариным, М.С. Ильюхиным, С.А. Иофиновым, Ю.К. Киртбая, Ю.А. Конкиным, В.М. Кряжковым, Л.И. Кушнareвым, А.Г. Левшиным, Э.И. Липковичем, В.М. Михлиным, М.С. Рунчевым, Б.С. Свирцевским, А.Н. Скороходовым и др.

Процесс внесения химикатов роботами является рациональным решением. Это улучшает условия труда персонала, избавляя его от непосредственной работы с химикатами. К тому же, точное местное применение препаратов снижает его расход. Раньше химикатом обрабатывали все поле целиком. А сейчас есть возможность применять специальную машину, способную вносить нужную дозу химиката на каждое конкретное растение.

Работники теплиц имеют массу рутинных действий в своем производстве по обработке земли, посадке, прополке и сборке урожая. Многие операции примитивны и повторяемы, поэтому эти операции легко поддаются автоматизации.

Анализ применения роботов в сельском хозяйстве показал, что применяется преимущественно колесный или гусеничный движитель. Такие движители просты как в производстве, так и в применении. Но они имеют недостатки перед применением шагающего движителя.

Каждый тип движителя применим для своей конкретной задачи. Колеса и гусеницы являются предпочтительными, но в условиях неровной поверхности преимущество колесных и гусеничных средств снижается.

При движении в сложных условиях шагающие машины с компьютерным управлением могут быть более эффективными в сравнении с традиционными колесными и гусеничными транспортными средствами. Шагающие машины привлекательны тем, что они способны передвигаться на местности, неровности которой соизмеримы с размером всей машины. В то время как гусеничные и колесные средства передвижения могут преодолевать препятствия меньше, чем половина диаметра их колес. Кроме того, шагающие машины, благодаря маневренности ее опор, способны передвигаться по крутым склонам. Одним из основных недостатков ша-

гающих машин является их невысокие скорости передвижения, динамические колебания корпуса машины во время движения и сложность алгоритмов управления.

Такие машины применимы в различных отраслях: добыча, разведка, военное применение, спасательные работы, работа в загрязненной или стерильной среде. При установке соответствующего оборудования возможно применение для обнаружения разрывов в телекоммуникационных линиях, проложенных под землей в местностях со сложным ландшафтом. Возможно применение на посевных площадях для точного мониторинга состояния выращиваемой культуры и о факторах негативно влияющих на рост и развитие растений (сорные растения, вредители, болезни). В этой области робот имеет преимущество перед колесными и гусеничными роботами, поскольку контактирует с землей в отдельно взятых точках и не наносит вред сельскохозяйственным растениям. Применение для мониторинга и ухода за сельскохозяйственными культурами, произрастающими в трудных ландшафтных условиях (выращивание риса на заливных лугах).

Шагающий робот не наносит вреда растениям. При некоторой модернизации конечностей он способен иметь хорошую проходимость в конкретном типе ландшафта.

Перспективно использование машин с шагающими движителями при внедрении новых почвосберегающих технологий в сельском хозяйстве.

Шагающие машины благодаря дискретному и близкому к статическому взаимодействию стоп с грунтом, практически не разрушают почвенный покров.

В главе II « Теоретические основы движения многоопорной шагающей машины, пути улучшения плавности и равномерности движения» приведен обзор шагающих движителей и рассмотрена их конструкция. Рассмотрены пути повышения плавности движения шагающих машин. Наглядно показаны их возможности и ограничения.

Взаимодействие стоп с грунтом

Традиционные колесные транспортные средства имеют сплошное взаимодействие с грунтом. Шагающие же машины, в свою очередь, взаимодействуют с грунтом точечно.

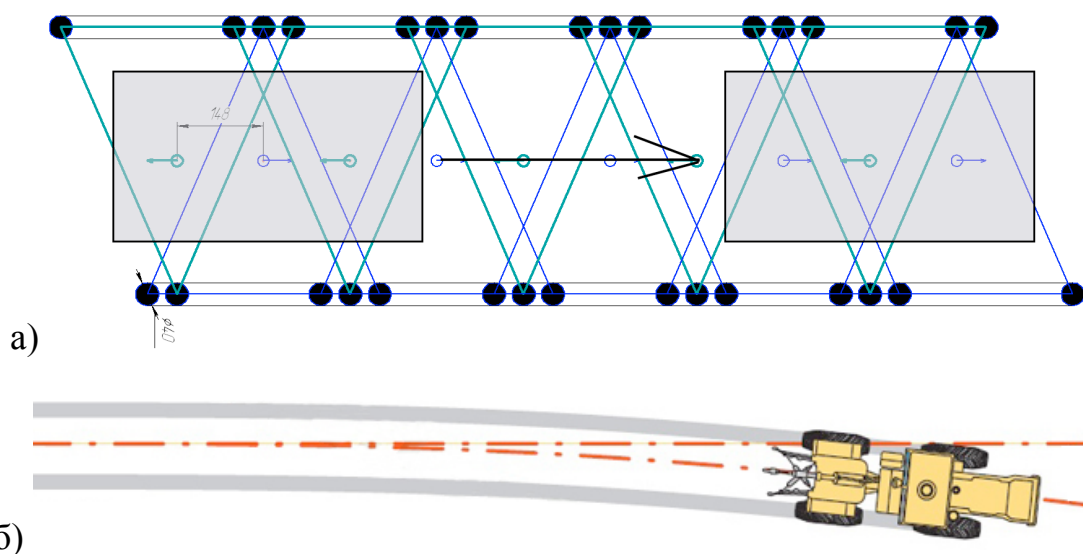


Рисунок 1. Взаимодействие движителя с грунтом а – шагающей машины, б – колесного трактора

Для оценки влияния движителя на грунт предлагаю сравнить площади сле-

дов за один шаг шагающей машины с площадью следа от колесного или гусеничного транспортного средства, рисунок 2. Из рисунка видно, что отношение площадей составляет приблизительно 0,32. Это значит, что шагающий движитель наносит вред грунту в три раза меньше чем колесный или гусеничный.

При маневрировании отношение площадей немного меняется и возрастает до 0,4 в следствии ограничения длины шага шагающего движитель, рисунок 3. Коэффициент при маневрировании оценить сложнее, т.к. необходимо провести сравнение с колесными средствами. А как известно, при повороте 4-х колесной машины следы от передней оси не совпадают со следами задней, что увеличивает площадь следа.

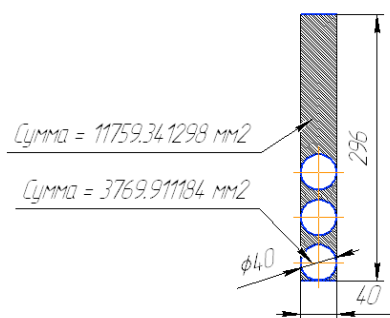


Рисунок 2. Сравнение площади взаимодействия с грунтом шагающей и колесной машины

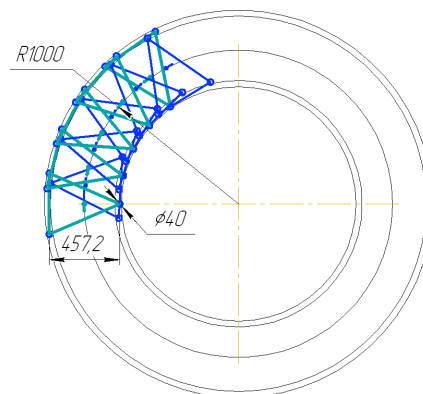


Рисунок 3. Взаимодействие стоп шагающей машины при повороте

В процессе движения платформы необходимо многократно решать прямую и обратную задачи кинематики. Задача прямой кинематики может быть решена множеством способов с применением различных систем отсчета и систем координат. Одним из простых способов решения прямой кинематики это перенос и поворот системы координат при помощи матриц. Такой подход во многих математических микропроцессорах реализован на аппаратном уровне, что увеличивает количество вычислений за единицу времени и снижает энергозатраты. Прямая кинематика позволяет определить характеристики рабочего пространства и точность позиционирования кончика опоры.

Обратная задача о положении манипулятора более сложная, чем прямая и нередко имеет множество решений. Во многих случаях ее эффективно можно решить только численно.

Обратная кинематика для опоры вычисляется геометрическим способом. Точка кончика опоры задается тремя координатами в пространстве $D(x, y, z)$. Для опоры с 4-мя неизвестными углами имеется множество решений. Для обычного движения используются только три степени свободы, поэтому существует конечное число решений, рисунок 4.

Параметры опоры:

$Z_p A = 60$ мм; $AB = 45$ мм; $BC = 85$ мм $CD = 160$ мм.

Задача определить углы α , β и δ при $\gamma = 0^\circ$.

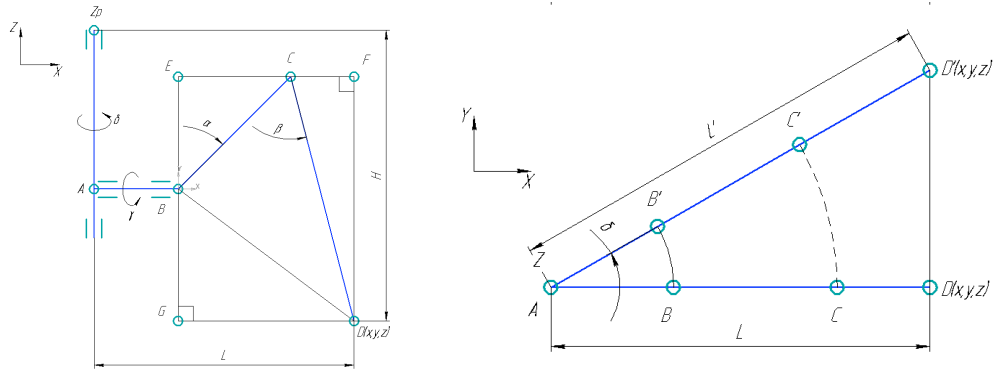


Рисунок 4. Кинематика опоры

$$L = \sqrt{x^2 \times y^2}, \quad (1)$$

$$H = z, \quad (2)$$

$$\text{Если } x \neq 0, \text{ то } \delta = \arctan \frac{y}{x} + \frac{\pi}{2}. \quad (3)$$

$$\text{Если } x = 0, \text{ то } \delta = \frac{\pi}{2}. \quad (4)$$

$$CD = L - AB, \quad (5)$$

$$BC = H - ZpA, \quad (6)$$

$$BD = \sqrt{BC^2 + CD^2}, \quad (7)$$

$$BD \geq BC + CD, \quad (8)$$

$$\beta = \arccos \left(\frac{BC^2 + CD^2 - BD^2}{2 \times BC \times CD} \right), \quad (9)$$

$$\text{Если } BC \neq 0, \text{ то } \angle GBD = \arctan \left(\frac{CD}{BG} \right). \quad (10)$$

$$\text{Если } BC = 0, \text{ то } \angle GBD = \frac{\pi}{2}. \quad (11)$$

$$\angle CBD = \arccos \left(\frac{BD^2 + BC^2 - CD^2}{2 \times BD \times BC} \right), \quad (12)$$

$$\text{Если } BG > 0, \text{ то } \alpha = \angle CBD + \angle GBD, \quad (13)$$

$$\text{иначе } \alpha = \angle CBD + \angle GBD + \pi, \quad (14)$$

$$EC = \sin \alpha \times BC, \quad (15)$$

$$EB = -\cos \alpha \times BC. \quad (16)$$

Для опоры с четырьмя степенями свободы имеется множество решений позиционирования для конкретно заданной координаты пространства. Чтобы решить эту задачу моделирования позиционирования, применен метод прямой кинематики. Данный метод определяет координату установки опоры по заранее заданным углам α , β , γ , и δ . Данная функция применяется для моделирования положения платформы по обратной связи и для управления опорой с применением всех 4-х степеней свободы.

$$f(\alpha, \beta, \gamma, \delta) = M \times \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Где М – результирующая матрица переноса и поворота.

Функция $f(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ возвращает координату точки опоры по углам. Она определена как последовательное умножение матриц переноса и поворота координаты точки. Разместив все возможные варианты решения в таблице можно получить обратную функцию, которая по трем координатам определит множество решений из которых автоматическая система управления выберет наиболее оптимальное.

Движение корпуса шагающей машины происходит под действием подвижных опор. Неравномерность передвижения обуславливается силами инерции, возникающие при ускорении движения опор. Кинематические возмущения, передаваемые корпусу машины, созданные шагающими движителями, передаются через упругие и подвижные соединения частей опор. Характер возмущений определяется математической моделью их движения. Для шагающих машин основным режимом движения является маршевый режим, для которого характерно поступательное движение по слабонесущей поверхности с уклонами и неровностями. Требуемые движения звеньев механизмов шагания можно обеспечить программным управлением и кинематической схемой механизма.

Генерация управляющих сигналов для движения платформы состоит из моделей перемещения опор при ходьбе или беге, что является основной проблемой для шагающих машин, поскольку имеется большое количество степеней свободы. Генерация движения шагающих машин исследовались в течении многих лет и существуют различные подходы к этой проблеме: жестко запрограммированные и адаптивные.

Жестко запрограммированные движения машины имеют генератор движения, приспособленный к определенной, заранее заданной модели окружающей среды. Примером такой среды может служить ровная поверхность пола по которому передвигается платформа. Такой алгоритм движения не справится с препятствиями на пути движения и потребует программирования для каждого отдельного случая.

Адаптивная генерация движения обусловлена вычислениями в режиме реального времени с контролированием множества параметров, таких как устойчивое положение, высота подъема над поверхностью, положение опор в пространстве, стабилизация движения и пр.

Как правило, синтез простых движений основан на кинематической модели. Очевидно, что исследования движения насекомых подсказывают модели генерации движения. Несмотря на свою простоту, этот метод не гарантирует оптимальное использование кинематических и динамических возможностей шагающей платформы. Существуют модели движения отсутствующие у насекомых. Несмотря на то, что данные модели не используются в природе, следует обратить внимание на такие модели движения для шагающих машин. Хотя насекомые являются простыми существами, они гораздо сложнее устроены, чем существующие роботы.

Для решения задачи управляемого движения шагающей платформы по неровной, бугристой поверхности необходимо знать параметры ориентации тела относительно этой поверхности для компенсации возникающих колебаний во время движения. В качестве параметров ориентации принимают углы между вертикалью и горизонтом. Во время движения возникают колебания корпуса. Эти колебания можно преобразовать в цифровой вид при помощи двух датчиков: углового и пря-

молинейного ускорения. Применяя преобразования Хафмана можно получить углы ориентирования корпуса машины с высокой точностью. Недостатком метода Хафмана является накапливаемое со временем отклонение. Что приводит к «уплыванию» нуля. Поэтому время от времени необходимо проводить установку точки отсчета.

Движение машины для трехногого способа передвижения задается путем определения координаты центральной точки для двух треугольников образованных точками опоры, длиной шага, ориентацией корпуса, направлением и скоростью движения. Также при движении необходимо учитывать режим разгона, движения, торможения и стоянки, рисунок 5. Для других способов передвижения, таких как волновой способ движения, двуногий способ алгоритм движения аналогичный, за исключением распределения смещения фаз движения для каждой опоры.

Режимы движения:

Стоянка – режим, при котором шагающая платформа не движется и не расходует энергию на поддержание веса. Корпус лежит на поверхности земли.

Остановка – режим, при котором шагающая платформа не движется и расходует энергию на поддержание веса. Корпус поднят над поверхностью земли.

Разгон – режим движения, при котором шагающая платформа начинает движение с ускорением до заданной скорости движения.

Движение – режим движения, при котором шагающая платформа движется с заданной скоростью.

Торможение – режим движения, при котором скорость платформы уменьшается до нуля.

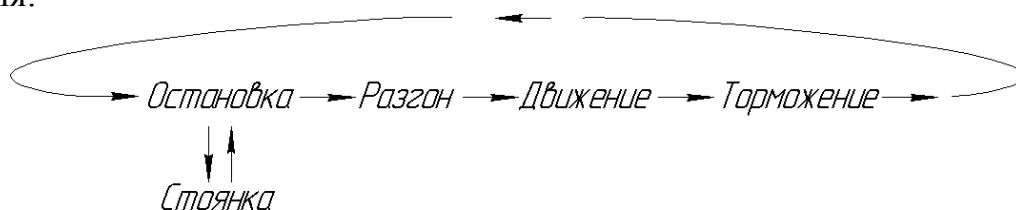


Рисунок 5. Режимы движения шагающей машины

Для решения задачи управления шагающей платформой необходимо знать параметры ориентации корпуса относительно заданной системы координат. В качестве параметров ориентации часто принимают кватернион поворота системы координат связанную с шагающей платформой и вектор угловой скорости относительно инерциальной системы координат. Знание текущих параметров ориентации необходимо не только для задач управления относительно центра масс, но и для задач управления движением центра масс аппарата. Однако вследствие ряда причин параметры ориентации известны с некоторой точностью, и эта ошибка в знании параметров приводит к ошибкам в исполнении управляющих воздействий, а, значит, и к ошибкам движения аппарата. По этой причине задача определения параметров ориентации шагающего аппарата с максимально возможной точностью, или с допустимой для задачи управления точностью, имеет большое значение.

Движение опоры можно описать кривой отображенной на рисунке 6. Участок **AB** кривой указывает на отрыв опоры от поверхности. Поднятие опоры происходит с движением по направлению **EA**. Данное движение обусловлено свойством пружинности опорной поверхности и самой опоры. Участок **BC** – это перенос опоры в центральную точку. На участке **BC** и **CD** происходит перемещение опоры в

новую позицию с предельно возможной скоростью, что создает временной запас на опускание опоры к поверхности и разворачивающий момент корпуса. На участке **DE** опора опускается на поверхность до контакта с ней и движется поступательно по направлению движения **EA**. На участке **EA** опора находится в контакте с поверхностью. Движение на участках **DE**, **EA** и **BA** медленнее движения **BCD**. Таким образом, временной интервал одного цикла движения опоры будет состоять из суммы времени движения на каждом из участков: $t = t_{AB} + t_{BC} + t_{CD} + t_{DE} + t_{EA}$, при этом перенос ноги в новую точку опоры должен осуществляться не медленнее суммарного времени опускания, движения и отрыва опоры $t_{AB} + t_{DE} \geq t_{BC} + t_{CD}$.

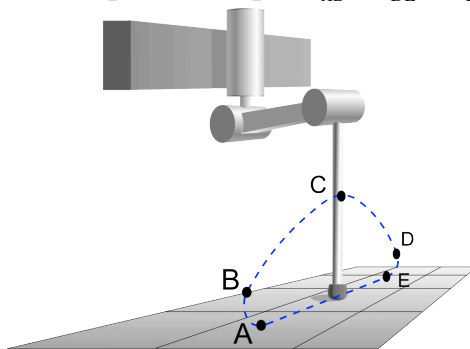


Рисунок 6. Траектория движения опоры

Движение шагающей платформы происходит путем перемещения пары из 3-х опор. Первые три опоры подняты над поверхностью земли, а другие три выполняют опорно-двигательную функцию. В статичном положении все шесть опор выполняют опорную функцию. Рабочее пространство опор ограничивает длину шага, рисунок 7

Переход от одной точки траектории к другой происходит по данным обратной связи: положению сервомотора и нагрузке на сервомотор. При движении из точки **B** в точку **D** важно определить момент времени, когда механизм достиг положения **D**, в случае, когда механизм не достигает заданного положения за отведенное для этого время необходимо предусмотреть действия по предотвращению опрокидывания.

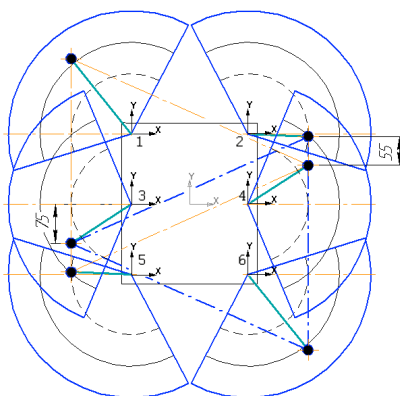


Рисунок 7. Ограничение длины шага рабочим пространством

Для построения алгоритма управления движением опоры по траектории, показанной на рисунок 6 необходимо изменять две координаты Y и Z во времени. Характер движения опоры зависит от скорости, направления движения и ориентации корпуса относительно поверхности земли, а также от высоты подъема точки касания опоры над этой поверхностью.

Движение машины, для трехногого способа передвижения, задается путем определения координаты центральной точки для двух треугольников образованных точками опоры, длиной шага, ориентацией корпуса, направлением и скоростью движения. Также при движении необходимо учитывать режим разгона, движения, торможения и стоянки. Для других способов передвижения, таких как волновой способ движения, двуногий способ алгоритм движения аналогичный, за исключением распределения смещения фаз движения для каждой опоры.

Траектории всех шести опор можно свести к одному алгоритму управления. Пусть машина первоначально находится в режиме остановки, ее опоры находятся в точке C_0 , рисунок 8.

По команде «двигаться» происходит переключение режимов из «остановка» в режим «разгон». Будем считать, что левый треугольник – это треугольник образованный точками опоры на поверхность с двумя опорами слева и одной справа. Правый треугольник – соответственно одной слева и двумя справа. Пусть разгон начинается с левого треугольника. Тогда, левый треугольник необходимо поднять над поверхностью земли и переместить по диаграмме по пути $C_0B_{разг}.CD$. А правый по C_0A_0 . По достижению конечных точек траектории «разгон» режим меняется на «движение». Пока правый треугольник, на который опирается в данный момент времени корпус машин, движется от точки A_0 к точке A , левый треугольник опускается на поверхность земли в точке E . Если левый треугольник не успевает достигнуть поверхности земли двигаясь по $EE_{пред.}$, а правый уже достиг точки A , то необходимо экстренно остановить движение, проконтролировать устойчивость корпуса и дожидаться опускания всех опор на поверхность. Производить поднятие правого треугольника в таком случае нельзя. Далее правый треугольник поднимается над поверхностью и движется по участку траектории AB с медленной скоростью, а по участку BCD с максимальной. На данной стадии принимается решение об изменении режима движения. Если режим остался «движение», то для его продолжения цикл повторяется. Если режим изменился на «торможение», то траектория движения опор изменяется.

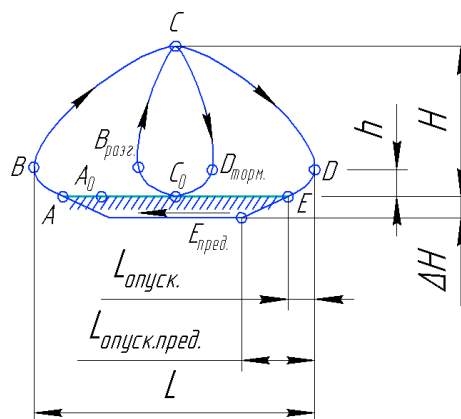


Рисунок 8. Диаграмма движения опоры

По команде «остановится» корпус замедляет движение, опоры устанавливаются в точке C_0 . При этом траектория опиравшегося треугольника будет $ABCD_{торм.}C_0$. А другого EC_0 .

Устойчивость шагающей машины определяется положением центра тяжести внутри плоского многоугольника образованного точками касания опор с поверхно-

стью. рисунок 9 и 10. На рисунке 11 показано как можно изменить границы устойчивости для соответствующих неустойчивых положений.

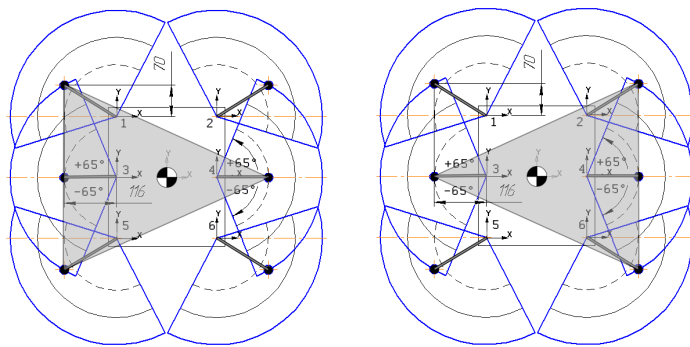


Рисунок 9. Устойчивое положение центра тяжести

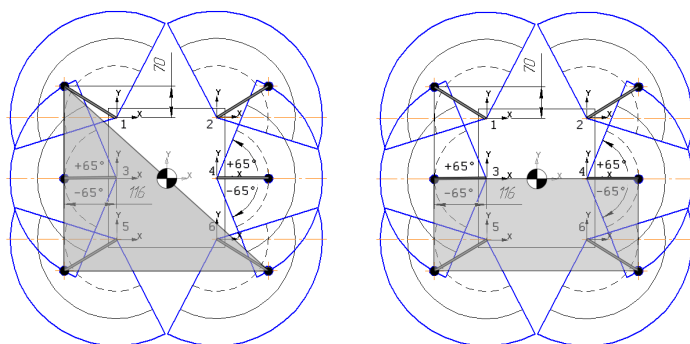


Рисунок 10. Положение центра тяжести у границы устойчивости

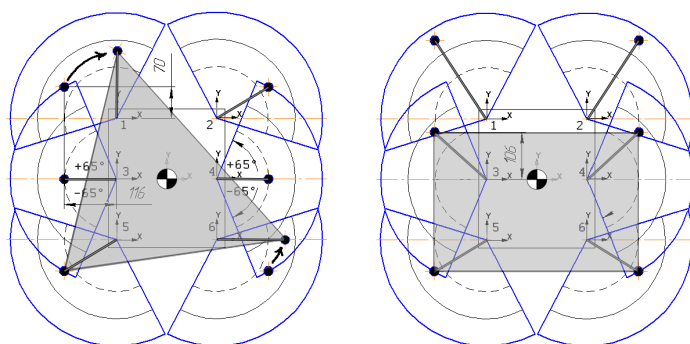


Рисунок 11. Изменение границ устойчивости

Передвижение шагающей машины по неровной, заранее неизвестной поверхности сложная задача. Она включает в себя адаптацию движения опор. Автоматическая система по информации с датчиков корректирует положение и траекторию движения опор. Математически описать автомат управления является тривиальной задачей, а вот получить информацию об окружающей среде на практике оказалось сложнее.

Движение машины основано на переносе веса машины с одних опор на другие. Поэтому главной задачей во время движения является определение момента времени соприкосновения опоры с поверхностью земли. А также определение момента времени когда опора достаточно нагружена весом всей машины, и способна удерживать вес.

В диссертационной работе предлагается применить модель управления с использованием системы с двойной обратной связью, позволяющую определять ре-

альное положение опор в пространстве и оценивать развиваемое ими усилие. Такая модель управления обеспечивает надежный контроль за движением и имеет преимущество перед существующими аналогами шагающих роботов с электроприводом.

В главе III «Экспериментальные исследования движения шагающей машины» приведены экспериментальные данные полученные с датчиков шагающей машины, рисунок 12. Приведены принципиальные схемы датчиков и описание их функционирования.

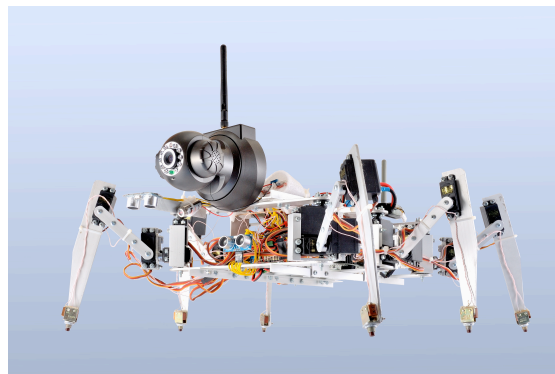


Рисунок 12. Экспериментальная шагающая машина

Проведены эксперименты по определению касания опоры с поверхностью. Результаты нагрузочных характеристик представлены на графиках, рисунок 13 и 14.

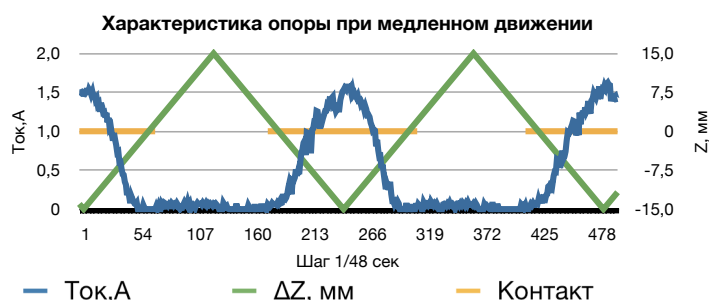


Рисунок 13. Касание опоры с поверхностью при медленном движении

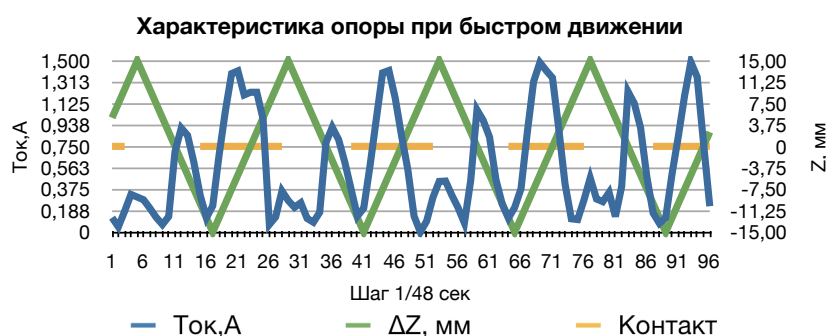


Рисунок 14. Касание опоры с поверхностью при быстром движении

Приведена методика определения распределения нагрузки. Из рисунка 15 можно сделать вывод, что баланс веса машины распределен неравномерно. Задние опоры расходуют больше энергии, чем передние.

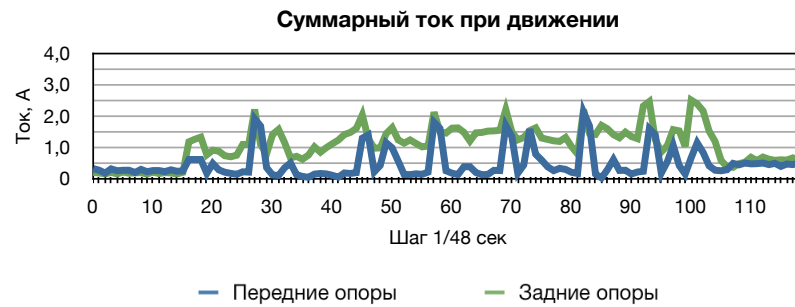


Рисунок 15. Перегружена задняя часть машины

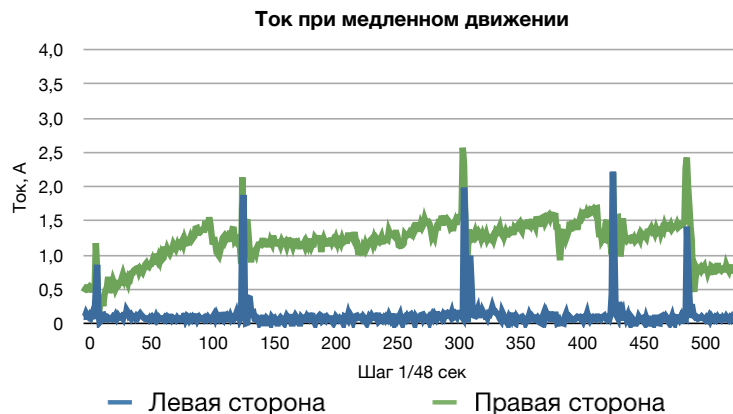


Рисунок 16. Перегружена правая сторона машины

В главе IV «Результаты исследования» приведены результаты моделирования движения шагающей машины по реальной неровной поверхности. Были выявлены параметры необходимые автоматической системе управления для устойчивого и плавного движения шагающей машины:

1. *Определение касания опоры с поверхностью.* Определение момента времени когда опора может удерживать вес машины является важным для быстрого и плавного движения шагающей машины.

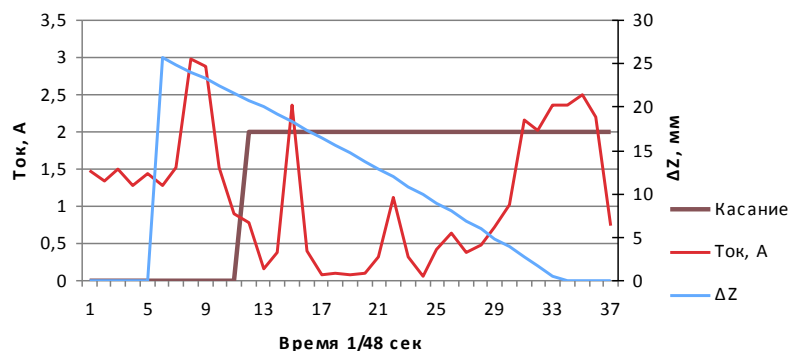


Рисунок 17. Определение момента времени касания опоры с поверхностью

2. *Положение центра тяжести.* Во время движения по потребляемому току опорой можно дать оценку положения центра тяжести. Если машина несет на себе груз смещенный относительно центра машины, то можно оценить какая часть машины нагружена сильнее (передняя или задняя, левая или правая).

3. *Сохранение устойчивости при проседании грунта под опорой.* При проседании или соскальзывании опоры может быть допущен чрезмерный крен маши-

ны, в следствии чего может произойти опрокидывание машины. Датчик положения привода и датчик нагрузки могут определить это и вовремя предупредить автоматическую систему.

4. Система стабилизации

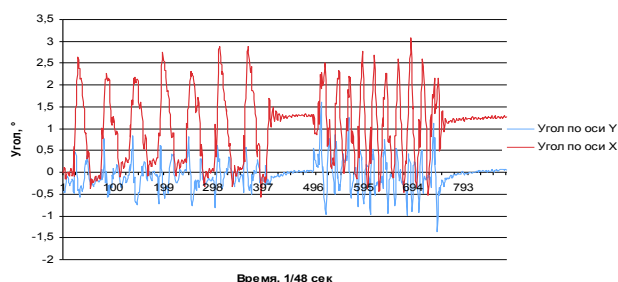


Рисунок 18. Движение со стабилизацией

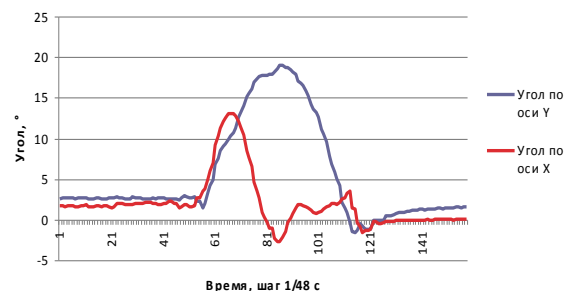


Рисунок 19. Движение без стабилизации

Использование роботизированного комплекса при возделывании растений защищенного грунта позволяет снизить затраты на ядохимикаты и антибактериальные препараты на 20% и снизить потери урожая от болезней на 15%, в результате чего годовой экономический эффект может составить 110 тыс. руб. на 1 га. При этом окупаемость нового оборудования составит 1,5 года.

Общие выводы.

1. Обоснованы параметры и режимы движения опытной роботизированной машины с дискретным колееобразованием. Установлено, что шагающие роботизированные машины можно оценить по таким параметрам как: длина шага по прямой 75 мм; смещение корпуса без отрыва опор от поверхности по оси X – 109 мм, по оси Y – 106 мм, угол поворота 27,25°; угол поворота за один полный шаг – 24°, движение по наклонной поверхности с углом склона до 49,7°, максимальная высота перешагиваемого препятствия – 16 см, Максимальная высота преодолеваемой ступеньки – 16 см, скорость движения – до 10 км/ч, грузоподъемность – до 0,5 кг, энергоемкость полного шага по прямой – 0,02 Вт.

2. Разработана математическая модель движения опор машины, а также методика расчета мощности приводов. Расчет показал, что при массе машины с полезной нагрузкой 3 кг, требуется крутящий момент привода не менее 10 кг·см.

3. Разработана математическая модель движения электромеханического средства с дискретным колееобразованием со стабилизацией движения по неровной поверхности. Математическая модель позволяет моделировать движение машины в виртуальном пространстве и давать оценку способа передвижения на заданной поверхности земли.

4. Разработана физическая модель электромеханического средства с дискретным колееобразованием со стабилизацией движения по неровной поверхности. Модель позволяет получать статистические данные об энергоэффективности заданного алгоритма движения. Определены способы предотвращения опрокидывания шагающей машины при соскальзывании опоры в яму или проседании грунта под опорой.

5. Разработанная система стабилизации движения обеспечивает удерживание корпуса в диапазоне углов $\pm 3^\circ$. Для движения без стабилизации углы наклона корпуса могут превышать 25° .

6. Разработан контроллер управления сервоприводами робота позволяющий получать данные о движении шагающей машины в режиме реального времени, что позволяет выбирать оптимальный способ передвижения для каждого конкретного типа поверхности. Контроллер также позволяет управлять дополнительным навесным оборудованием: системой внесения жидкого удобрения, системой выявления болезнетворных микроорганизмов.

7. Использование роботизированного комплекса при возделывании растений защищенного грунта позволяет снизить затраты на ядохимикаты и антибактериальные препараты на 20% и снизить потери урожая от болезней на 15%, в результате чего годовой экономический эффект может составить 110 тыс. руб. на 1 га. При этом окупаемость нового оборудования составит 1,5 года.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах (курсивом выделены работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК):

1. **Алейников Ю.Г.** Особенности применения датчиков в автоматической системе движения шагающих машин [текст] / Дидманидзе О.Н., Митягина Я.Г., Алейников Ю.Г. // *Международный технико-экономический журнал*. – 2012. – №5. – С.72-75

2. **Алейников Ю.Г.** Методика определения рабочего пространства опоры шагающей машины. [текст] / Алейников Ю.Г. // *Международный технико-экономический журнал*. – 2013. – №1. – С.98-99

3. **Алейников Ю.Г.** Методика расчета приводов для многоногих шагающих машин на примере шестиногой шагающей машины. [текст] / Алейников Ю.Г. // *Международный технико-экономический журнал*. – 2013. – №1. – С.100-101

4. **Алейников Ю.Г.** Беспроводной контроллер сервомеханизмов системы распознавания маркировок пластмассовых деталей // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Научные проблемы автомобильного транспорта» // Дидманидзе О.Н., Митягин Г.Е., Алейников Ю.Г. – М.: УМЦ «Триада», 2010. – С. 34-35.

5. **Алейников Ю.Г.** Программное и аппаратное обеспечение систем распознавания рельефных маркировок // Сборник материалов I всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса» / Митягин Г.Е., Егоров Р.Н, Мельников Ю.А., Алейников Ю.Г. – Магадан: Издательство СВГУ, 2011. С. 225

6. **Алейников Ю.Г.** Применение фотограмметрии в автоматизации сельскохозяйственного производства / Сборник статей X международной научно-практической конференции «Прогрессивные технологии в транспортных системах» Алейников Ю.Г. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2011. С. 7 – 8

7. **Алейников Ю.Г.** Программное и аппаратное обеспечение сортировки полимерных материалов, извлекаемых из утилизируемых автомобилей / Сборник статей X международной научно-практической конференции «Прогрессивные тех-

нологии в транспортных системах»/ Митягин Г.Е., Алейников Ю.Г., Авдеев Е.А. - Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2011. С. 206 – 209

8. **Алейников Ю.Г.** Шасси шагающее универсальное: назначение и особенности (производственно-практическое издание к международному форуму «Открытые инновации-2012» / Дидманидзе О.Н., Митягин Г.Е. Алейников Ю.Г. - М.: ООО «УМЦ «Триада», 2012. 10 с.