

На правах рукописи



**САФРОНОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЯ ОПОРНОЙ  
ПОВЕРХНОСТИ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С КОЛЕСАМИ  
МОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ В УСЛОВИЯХ АПК**

Специальность: 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Барнаул - 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель: Павлюк Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Красовских Виталий Степанович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет», профессор кафедры «Тракторы и автомобили»

Федюнин Павел Иванович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет», заведующий кафедрой «Автомобили и тракторы»

Ведущая организация: Государственное научное учреждение Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук

(ГНУ СибИМЭ Россельхозакадемии)

Защита диссертации состоится 11 декабря 2013 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.004.02 при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, <http://www.altstu.ru>; [ntsc@desert.secna.ru](mailto:ntsc@desert.secna.ru); Тел/факс (3852)36-71-29.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова и на сайте [www.altstu.ru](http://www.altstu.ru)

Автореферат разослан «30» октября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Куликова Лидия  
Васильевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Развитие агропромышленного комплекса во многом зависит от технического обеспечения. Широкое распространение для механизации сельскохозяйственных операций получили колесные мобильные машины, перемещающиеся в процессе работы по поверхности поля, на котором выращиваются сельскохозяйственные культуры. Из агротехнических требований, условий передвижения мобильных машин, качества выполнения технологических операций считается наиболее удобной горизонтальная поверхность поля с минимальными неровностями. Поэтому имеется потребность в периодическом проведении контроля формы поверхностей для определения необходимости соответствующих коррекций по выравниванию. Как показал проведенный анализ, имеющиеся способы такого контроля недостаточно совершенны и применение их для деформируемых поверхностей в условиях сельскохозяйственного производства затруднительно.

Рельеф, механические свойства, структура, влажность и состав почвы поддерживаются в первую очередь близкими к оптимальным для выращивания сельскохозяйственных культур. Форма поверхности будет также зависеть и от наличия корневой системы культурных растений и сорняков, следов работы почвообрабатывающих орудий и т.д.

Поэтому при взаимодействии колес с опорной поверхностью происходит деформация и уплотнение верхнего слоя почвы, образование колеи, проскальзывание колес относительно опорной поверхности. Степень деформации почвы будет зависеть также и от нагрузки на колесо, размеров колеса и формы протектора. При повторных проходах колес деформация почвы будет увеличиваться.

Поэтому исследования, направленные на разработку и оценку показателей деформируемой опорной поверхности при взаимодействии с движителями мобильных машин являются актуальными.

**Целью работы** является разработка способов контроля и определения параметров профиля опорной поверхности, взаимодействующего с колесами мобильной машины, при производстве растениеводческой продукции и при экспериментальных исследованиях.

**Объект исследования:**

- процесс взаимодействия колесной мобильной машины с опорной поверхностью.

**Предмет исследования:**

- закономерности изменения процесса взаимодействия колесного движителя с опорной поверхностью.

**Научная новизна:**

- определены и обоснованы эффективные методы получения характеристик неровностей опорных поверхностей, обоснованы параметры оборудования для практической реализации предложенных методов;

- получены зависимости для определения углов неуправляемого поворота колес мобильной машины при передвижении по неровностям;

- получены закономерности влияния размеров и формы неровностей опорной поверхности на перемещения различных точек мобильной машины в вертикальной плоскости при движении.

- обоснована возможность применения косвенных и прямых способов определения характеристик профиля как деформируемой, так и недеформируемой опорной поверхности, определены зависимости, характеризующие взаимодействие неровностей с колесами мобильной машины.

Техническая новизна исследований подтверждается патентом РФ на изобретение № 2468142 (Установка для определения характеристик профиля деформируемых опорных поверхностей).

**Практическая значимость:** результаты исследований позволяют более точно и оперативно получать характеристики неровностей опорной поверхности и произвести в соответствии с этим выбор используемых мобильных колесных машин по конструктивным и эксплуатационным параметрам.

**Методология и методы исследования.** Применялись методы теоретической механики, математического моделирования. Экспериментальные исследования проводились как в полевых условиях, так и на лабораторных установках с использованием современной измерительной аппаратуры, с прикладным программным обеспечением. Разработанные методики основываются на основных положениях физики, механики и математики. Выводы теоретического анализа подтверждаются удовлетворительным совпадением с результатами модельных и натуральных экспериментов.

**Положения, выносимые на защиту:**

- методы и оборудование для определения характеристик неровностей деформируемой опорной поверхности и результаты экспериментальных исследований;

- зависимости для определения отклонений колесной мобильной машины под действием неровностей.

**Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность результатов обеспечивалась применением фундаментальных положений физики, теоретической механики и математики. Выводы теоретического анализа были подтверждены удовлетворительным совпадением с результатами экспериментальных исследований.

Основные результаты были представлены на 68-й научно-технической конференции «Научное творчество сотрудников и студентов автотранспортного факультета», Барнаул, 2010 г.; на VIII-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь - 2011», Барнаул, 2011 г.; на 69-й, 70-й и 71-й научно-технических конференциях «Научное творчество сотрудников и студентов факультета энергомашиностроения и автомобильного транспорта», Барнаул, 2011-2013 гг.; II-й Всероссийской научно-технической конференции 23-24 ноября 2012 г., г. Рубцовск.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 15 печатных работах, из них 3 опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для кандидатских диссертаций. По конструкции установки для определения ха-

рактических характеристик профиля деформируемых опорных поверхностей получен патент РФ на изобретение № 2468142 (Установка для определения характеристик деформируемых опорных поверхностей).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и основных выводов. Текст диссертации изложен на 175 страницах основного текста, включает 80 рисунков, 3 таблицы, библиографический список из 162 наименований, 3 приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследований, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проанализировано состояние проблемы, определены задачи исследования.

Отмечено, что в исследованиях академиков В.Н. Болтинского, В.П. Горячкина, А.П. Грибановского, В.А. Желиговского, профессоров, д.т.н. Л.Е. Агеева, В.В. Кацыгина, Ю.К. Киртбая, И.Т. Коврикова, В.С. Красовских, В.А. Ксендзова, А.Б. Лурье, А.И. Любимова, Е.П. Огрызкова значительное внимание уделено влиянию рельефа поля на характеристики движения мобильных машин.

В настоящее время вместо полевых испытаний транспортных средств все большее применение находит математическое моделирование их движения, как обоснованный теоретически и отработанный практически способ испытаний, который позволяет значительно сократить как материальные расходы, так и трудовые и временные статьи затрат при их проведении и усовершенствовании. Учет внешних возмущений со стороны неровностей опорной поверхностей позволяет получить более точные результаты.

Микропрофиль опорной поверхности в настоящее время принято рассматривать как случайную функцию со следующими допущениями: функция стационарна и эргодична; ординаты микропрофиля подчиняются нормальному закону распределения; длины неровностей ограничены; микропрофиль меняется случайным образом только в вертикальной продольной плоскости. Основной статистической характеристикой микропрофиля однородного участка является его спектральная плотность или корреляционная функция. С целью проверки гипотезы нормальности и стационарности процессов могут определяться также функции или плотности распределения, моменты третьего и четвертого порядков и т.п.

Применяемые в настоящее время непосредственные способы измерения характеристик профиля дают высокую точность, но трудоемки, требуют значительных затрат времени.

Косвенные способы обеспечивают высокую производительность, но относятся преимущественно к контролю поверхностей с твердым покрытием, в основном для автомобильных дорог. Представляет интерес использование непо-

средственно мобильной машины в качестве динамической системы для оценки уровня внешних возмущений.

Известные способы и установки разработаны преимущественно для контроля ровности опорных поверхностей с твердым покрытием, в то время как в сельскохозяйственном производстве движение мобильных машин происходит большей частью по деформируемым покрытиям.

Отсутствуют технические средства для определения рельефа больших площадей, например, при планировке поля, без контакта с опорной поверхностью, искажающего первоначальную форму.

Причиной появления первичных колебаний мобильных машин микро-рельефа опорной поверхности является неровности с длиной волны неровности от 0,3 до 50 м. Современные колесные мобильные машины наиболее заметно реагируют на частоты возмущающих воздействия от 0,5 до 25 Гц. Размер неровности характеризуется двумя параметрами – высотой (глубиной) и длиной.

Основой для определения основных характеристик как макропрофиля так и микропрофиля служит числовой ряд ординат опорной поверхностей, полученный для одного или нескольких сечений. Встречающиеся одиночные неровности, значительно превышающие по размеру остальные, требуют дополнительного рассмотрения взаимодействия их с колесами мобильной машины.

Процесс возникновения неуправляемого поворота колес мобильной машины при деформации упругих элементов подвески во время движения по неровностям микропрофиля в существующих исследованиях рассмотрен недостаточно полно. Необходимо получение аналитических зависимостей для выбора эксплуатационных и конструктивных параметров подвесок и рулевого привода мобильных машин, занятых в сельскохозяйственном производстве.

#### **Задачи исследования:**

- разработать способы и устройства контроля характеристик неровностей как контактными, так и бесконтактными способами для деформируемых и недеформируемых опорных поверхностей;
- определить параметры перемещений мобильной машины в вертикальной плоскости при движении по неровностям;
- оценить влияние деформации упругих элементов подвески мобильной машины на неуправляемый поворот колес;
- провести оценку эффективности результатов исследований.

**Во второй главе** рассмотрено взаимодействие опорной поверхности с колесами мобильных машин и с измерительными устройствами.

*Определено влияние неровностей опорной поверхности на перемещения мобильной машины в вертикальной плоскости.* Разработана методика предварительной оценки перемещения любой точки  $C$  мобильной машины при переезде через единичную неровность определенной формы. Расчетная схема обобщенной мобильной машины представлена на рисунке 1.

На рисунке 2 представлена схема качения колеса радиусом  $R$  по единичной неровности. Расположим неподвижную систему координат  $XOZ$  на опорной поверхности. Предположим, что поверхность единичной неровности опре-

делена зависимостью  $z = f(x)$ . Определим кривую, которую опишет точка  $A_1$  с координатами  $(\xi, \eta)$ , связанная с центром колеса, при перекатывании через неровность.

В результате расчетов получим координаты этой точки в следующем виде:

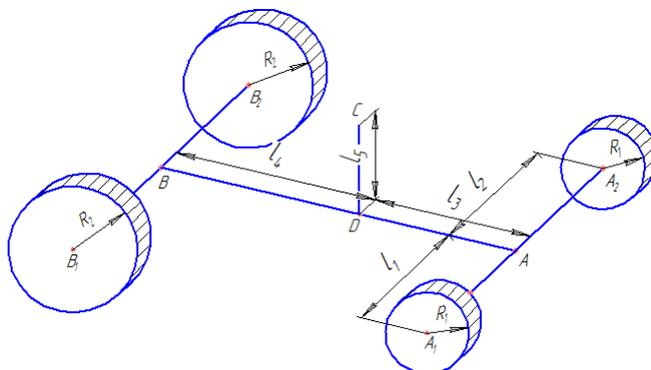


Рисунок 1 – Расчетная схема обобщенной мобильной машины

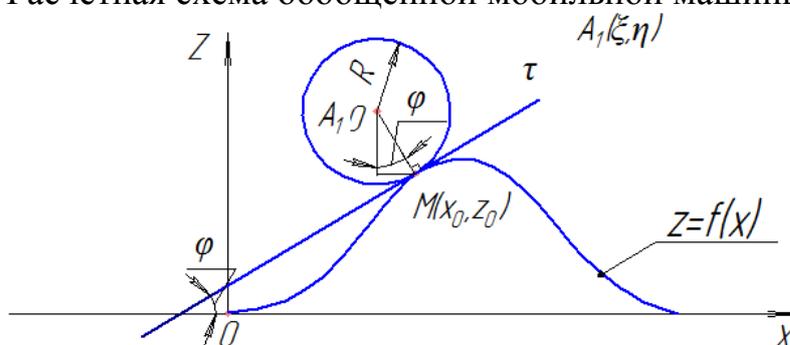


Рисунок 2 – Схема качения колеса через неровность

$$\left. \begin{aligned} \xi &= x_0 - \frac{R \cdot z'_0}{\sqrt{1 + z_0'^2}} \\ \eta &= z_0 + \frac{R}{\sqrt{1 + z_0'^2}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Для произвольной точки  $C$ , жестко связанной с мобильной машиной, координаты определяются как:

$$x_C = \frac{x_0 - l_3 - l_4 + \frac{l_4}{l_3} \cdot \xi}{1 + \frac{l_4}{l_3}} - l_5 \cdot \frac{\left( \frac{R_2 - \eta}{x_0 - l_3 - l_4 - \xi} \right)^2}{\sqrt{1 + \left( \frac{R_2 - \eta}{x_0 - l_3 - l_4 - \xi} \right)^2}} \quad (2)$$

$$z_C = \frac{R_2 + \frac{l_4}{l_3} \cdot \eta}{1 + \frac{l_4}{l_3}} + l_5 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{R_2 - \eta}{x_0 - l_3 - l_4 - \xi} \right)^2}} \quad (3)$$

Как показали исследования различных авторов, во многих случаях форма неровностей опорных поверхностей сельскохозяйственных полей, соответствует близкой к синусоидальной, что вызвано воздействием колес мобильных машин, образующих наиболее устойчивую форму неровностей.

Будем считать, что кривой  $z = f(x)$  соответствует полупериод синусоиды  $z = H \sin((\pi/x_n)x)$ , где:  $H$  – наибольшая высота неровности;  $x_n$  – длина неровности в направлении движения;  $x$  – пройденный путь.

Первая и вторая производные по зависимостям, определяющим перемещения различных точек мобильной машины, определяют их скорости и ускорения при переезде через неровность.

Полученные при расчете параметры могут быть использованы при расчете динамических нагрузок, действующие на машину от неровностей опорной поверхности.

На рисунках 3...4 показаны примеры полученных зависимостей вертикальных перемещений по неровностям различной формы.

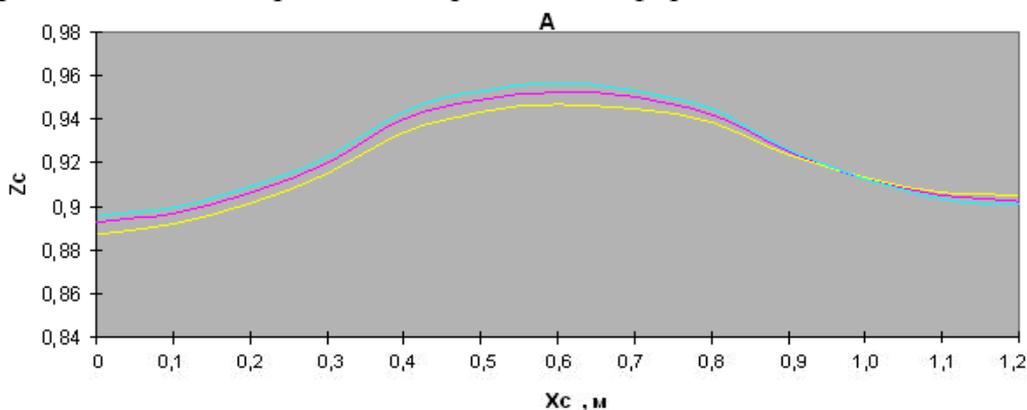


Рисунок 3 – Изменение  $Z_c$  при переезде через неровность синусоидальной формы

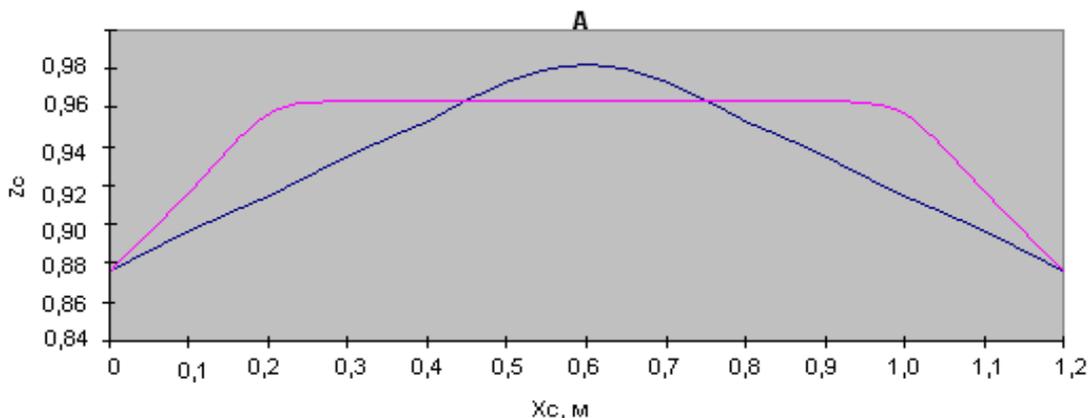


Рисунок 4 – Перемещение центра масс мобильной машины  $Z_c$  при движении через неровность треугольной и трапециевидной формы

*Определено влияние деформации упругих элементов подвески на неуправляемый поворот колес мобильной машины. Особенностью распространенных зависимых подвесок с продольным расположением рессор является неуправляемый поворот колес за счет деформации упругих элементов при переезде неровностей. Это ведет к ухудшению курсовой устойчивости, повышению уровня колебаний.*

Расчетная схема зависимой подвески с рулевым приводом приведена на рисунке 5.

Определены величины углов поворота колес в зависимости от деформации упругих элементов при различных видах нагружения.

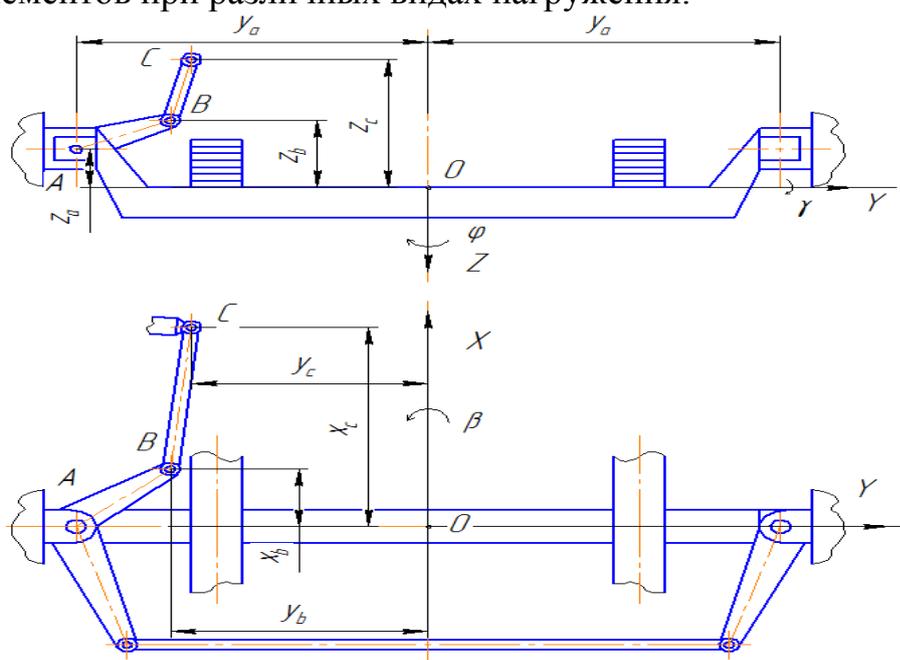


Рисунок 5 – Расчетная схема зависимой подвески с рулевым приводом

Угол поворота управляемого колеса может быть представлен как сумма углов поворота от поворота рулевого колеса, линейных перемещений моста в вертикальном, поперечном и продольном направлениях, а также от углов поворота моста в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Управляемый поворот колес осуществляется только от рулевого колеса. В случае неуправляемых колес неуправляемый поворот проявляется только при повороте моста в горизонтальной плоскости относительно рамы мобильной машины.

*Установлена возможность использования непосредственно мобильной машины в качестве динамической системы для оценки характеристик профиля опорной поверхности.* В этом случае в качестве копира используются колеса мобильной машины, а при измерениях будут учтены действительные деформации почвы под колесами и взаимодействие колес с неровностями опорной поверхности.

Основой применения такого способа может явиться запись параметров, характеризующих колебания звеньев мобильной машины при движении по определенному виду опорной поверхности. Затем при помощи обратного пересчета для динамической математической модели используемой мобильной машины производится определение составляющих главного вектора и главного момента внешних возмущений, действующие на колеса мобильных машин со стороны неровностей опорной поверхности. Эти показатели и будут характеризовать микропрофиль поверхности. В этом случае учитываются как конструктивные параметры мобильной машины, так и деформация неровностей опорной поверхности при взаимодействии с колесами и соответственно, определяются возникающие колебания в горизонтальной плоскости.

Рассматривалось два варианта расчетных схем мобильных машин. В первом варианте представлена более простая «велосипедная» модель каждого звена, позволяющая делать упрощенный расчет характеристик влияния неровностей. Второй, более точный вариант, относится к двухзвенным мобильным машинам, имеющим звенья с двумя осями с двумя колесами на каждой.

На рисунке 6 приведена расчетная схема трактора с шарнирной рамой, а на рисунке 7 - схема распределения скоростей движения секций трактора.

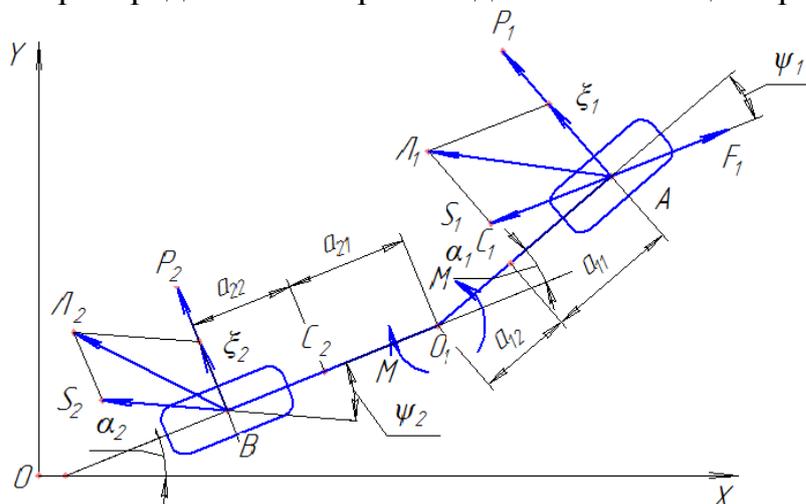


Рисунок 6 - Расчетная схема трактора с шарнирной рамой

На схемах приняты следующие обозначения:  $F$  – равнодействующая сил тяги одной оси;  $S$  – равнодействующая сил сопротивления качению колес одной оси;  $P$  – главные векторы боковых сил на оси;  $\psi$  – угол увода эквивалентных колес одной оси;  $\zeta$  – равнодействующая случайных дестабилизирующих воздействий, приложенные к колесам оси со стороны опорной поверхности;  $a$  – расстояния от центров масс секций  $C$  до осей и шарнира (индекс 1 относится к передней секции, индекс 2 – к задней секции трактора);  $\alpha_1$  – угол складывания рамы трактора;  $\alpha_2$  – угол, составляемый продольной осью задней секции трактора с неподвижной осью координат  $OX$ ;  $M$  – момент на шарнире складывания рамы трактора;  $V_1, V_2$  – скорости центрального шарнира рамы и центра масс задней секции трактора.

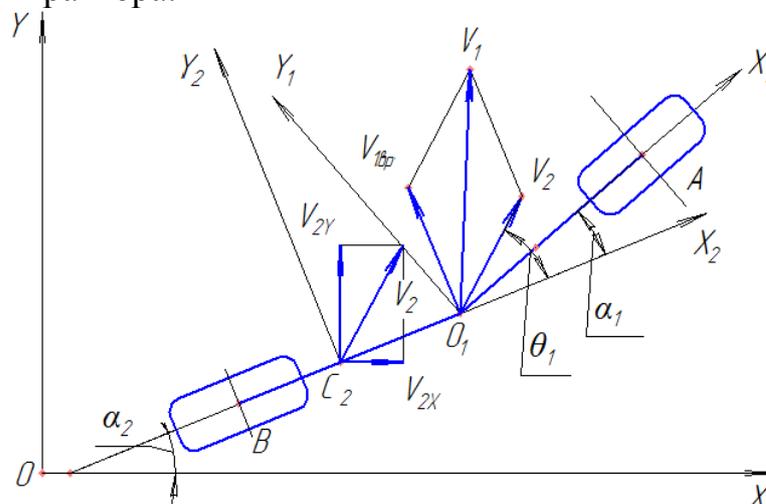


Рисунок 7 – Схема распределения скоростей движения секций трактора

Для составления уравнений движения использованы уравнения Лагранжа второго рода. С учетом сделанных допущений и предположений движение трактора может быть рассмотрено как обладающее четырьмя степенями свободы. В соответствии с принятым числом степеней свободы выбраны четыре обобщенных координаты:  $x$ ,  $y$  – координаты центра масс задней секции трактора;  $\alpha_1$  – угол складывания рамы трактора;  $\alpha_2$  – угол, составляемый продольной осью задней секции трактора с неподвижной осью координат  $OX$ .

При определении главных векторов боковых сил считалось, что поперечная деформация шины пропорциональна угловой.

На основании схемы распределения скоростей движения секций трактора определялась взаимосвязь между скоростями точек  $C_2$  и  $O_1$

Полученные дифференциальные уравнения движения трактора могут быть использованы для численного определения реализаций равнодействующих случайных возмущений  $\bar{\xi}_1$  и  $\bar{\xi}_2$  со стороны неровностей опорной поверхности, поступающих на колеса передней и задней осей, по экспериментально определенным реализациям  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $\alpha_1(t)$  и  $\alpha_2(t)$ . Эти результаты характеризуют микропрофиль опорной поверхности, пригодны для использования при математическом моделировании движения мобильных машин с учетом влияния неровностей.

Аналогично были получены дифференциальные уравнения для второго варианта мобильной машины.

**В третьей главе** представлен ряд новых способов и устройств для определения характеристик профиля опорных поверхностей с использованием патентов, полученных патентообладателем АлтГТУ.

*Универсальная установка* (рисунок 8) обеспечивает одновременное измерение характеристик микропрофиля, макропрофиля опорной поверхности и твердости почвы непосредственным методом (патент РФ № 2110638).

Универсальная установка состоит из рамы 7, к которой крепятся ступицы 8 опорных колес 14, и части моста, с закрепленными на установленных в них полуосях опорными колесами. На других концах полуосей установлены звездочки цепных передач 2 и 12.

Вторые звездочки передач установлены на концах синхронизирующего вала 9, который посредством подшипниковых опор 13 закреплен на раме установки. Звездочки соединены между собой втулочно-роликовыми цепями.

К дискам колес посредством вращающихся опор 3 прикреплены направляющие 10, по которым происходит перемещение решетки 6. Решетка 6 перемещается по направляющим при помощи роликов 4. На раме установки закреплены датчик угла продольного и поперечного наклона рамы относительно горизонтальной плоскости (гировертикаль) 15 и датчик угла поворота колеса 16. На верхней поверхности решетки установки закреплены контакты датчиков касания 11 опорной поверхности (81 датчик). Установка перемещается при помощи тягача, с которым она соединяется при помощи дышла 1 с тягово-сцепным устройством. Также установка имеет датчик возврата решетки 17 в исходное поло-

жение. В начале измерений решетка установки располагается в самой верхней точке.

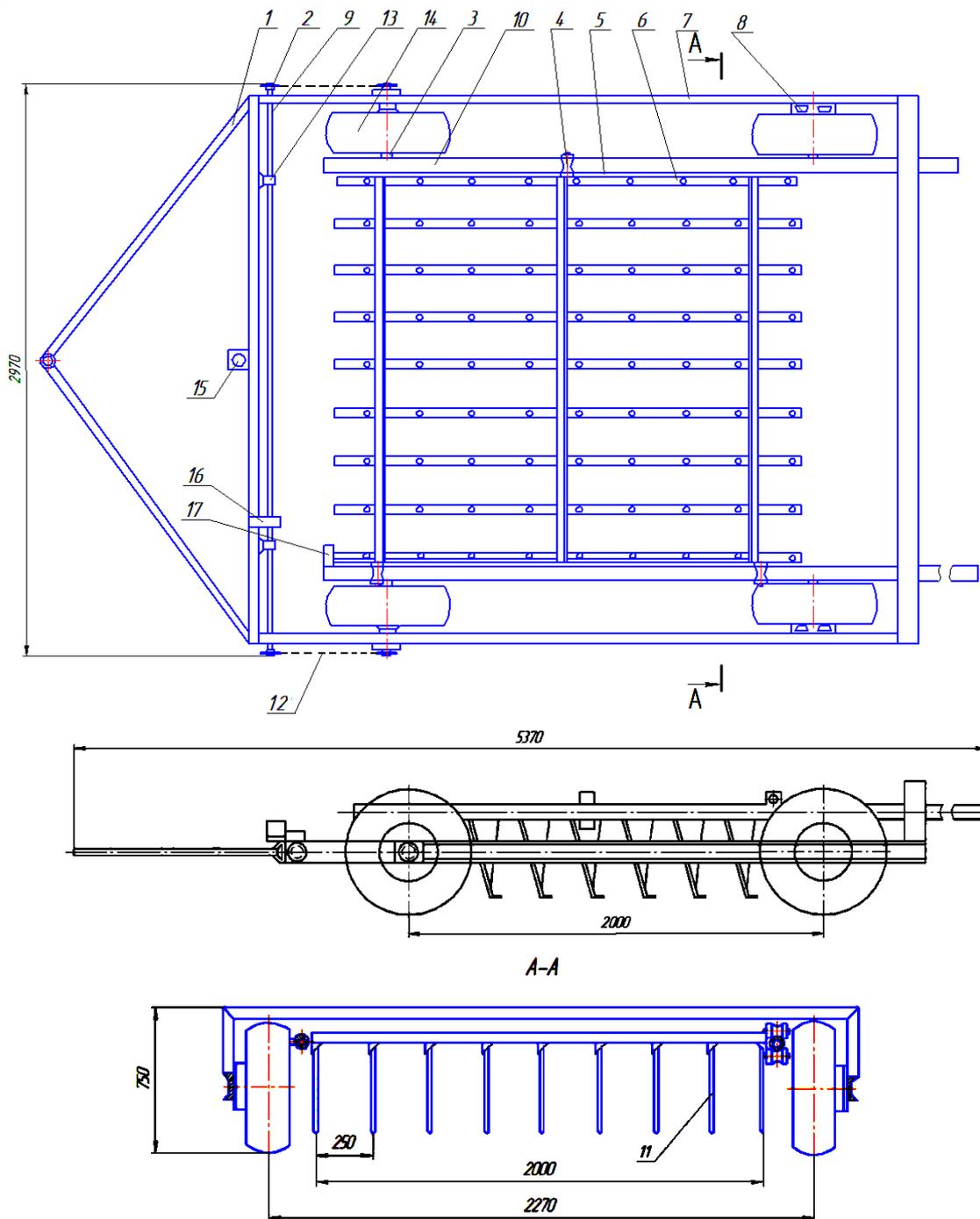


Рисунок 8 – Схема универсальной измерительной установки

При буксировании установки тягачом начинают вращаться опорные колеса 14. При этом начинают опускаться вращающиеся опоры 3 направляющих 10 решетки 6 и, соответственно, сами направляющие 10, опуская решетку с установленными на держателях 5 датчиками касания 11. Совместно с датчиками касания, согласно патенту, могут быть установлены устройства для задавливания зондов, определяющих зависимость глубины внедрения зонда от усилия нагружающей пружины. Эта зависимость характеризует плотность грунта. В настоящих исследованиях эта функция установки не используется.

В момент касания датчиками опорной поверхности дороги, решетка останавливается на месте контакта, в то время как сама установка будет продолжать движение.

Решетка 6 будет перекачиваться на роликах 4 по своим направляющим 10. Датчик угла поворота колес 16 позволяет определить угол поворота колес и путь, пройденный установкой после замыкания/размыкания каждого контакта датчиков касания, а также высоту неровности опорной поверхности в каждой контрольной точке.

При дальнейшем повороте опорных колес решетка начнет подниматься вверх, возвратный механизм решетки вернет ее в исходное положение. Таким образом, установка будет готова к новому циклу работы. Следовательно, датчики касания определяют форму неровностей микрорельефа, а показания гироскопов характеризуют макрорельеф.

Установка оборудована измерительной и регистрирующей аппаратурой.

В устройстве для снятия профилограмм поверхностей (свидетельство на полезную модель РФ № 28700) используется спутниковая радионавигационная система. Применение дифференциального режима работы такой системы с дополнительным передатчиком может увеличить точность определения координат объекта до нескольких сантиметров (рисунок 9).

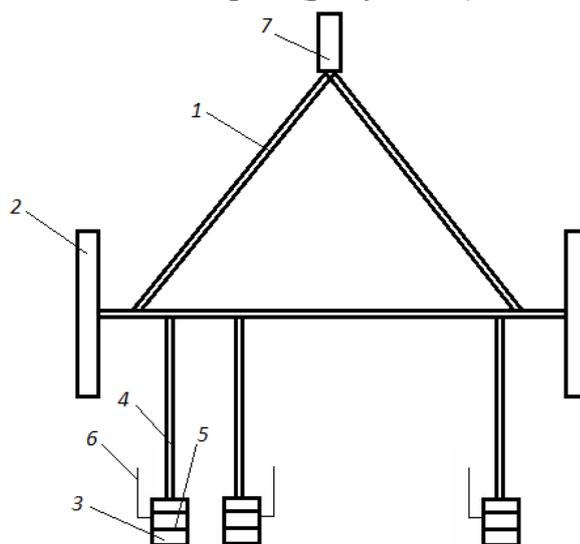


Рисунок 9 – Схема установки с применением приемников спутниковой навигационной системы

Рама 1 с опорными колесами 2 буксируется по измеряемому участку тягачом при помощи сцепного устройства 7. К раме с определенным шагом шарнирно закреплены измерительные устройства 3 при помощи рычагов 4, снабженные колесами и приемниками спутниковой радионавигационной системы 5 с антеннами 6. При этом каждое измерительное устройство будет двигаться, копируя профиль опорной поверхности на своем участке. Периодически приемники, установленные на измерительных устройствах, будут точно определять долготу, широту и высоту над уровнем моря антенны 6 приемника 3, движущегося на определенном расстоянии над опорной поверхностью.

Компьютер, соединенный с приемниками измерительных устройств, определяет характеристики профиля опорной поверхности. Такое устройство позволяет при движении со значительной скоростью, снимать при этом профили дорожной поверхности, соответствующие траекториям движения измерительных колес. Однако в случае деформируемых покрытий опорной поверхности результаты измерений будут неточными, поскольку деформация опорной поверхности от измерительных колес установки будет отличаться от деформации колесами реальной машины.

Схема установки для определения характеристик профиля деформируемых опорных поверхностей (патент РФ № 2351091) приведена на рисунке 10.

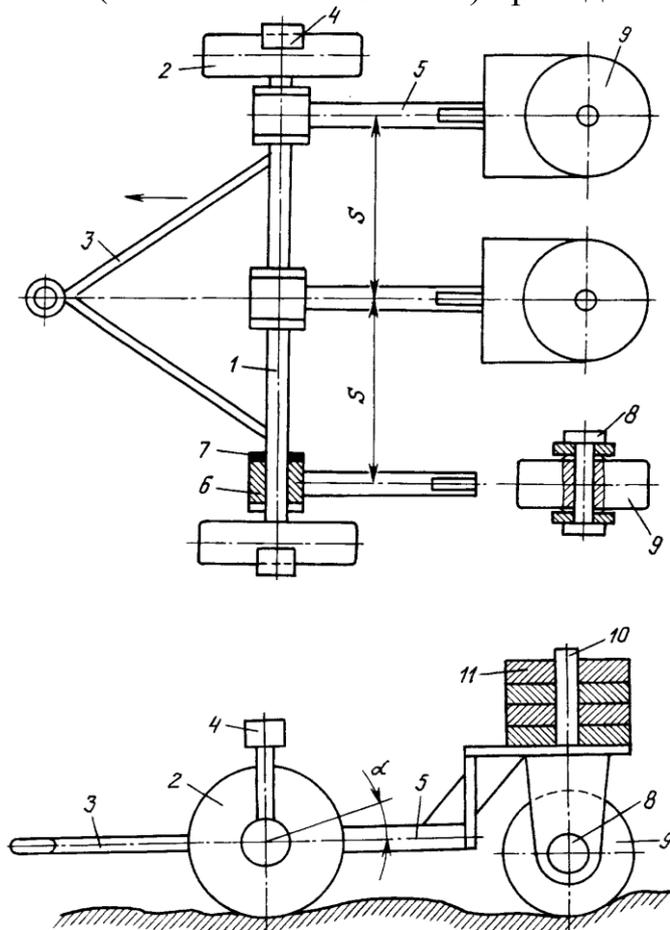


Рисунок 10 – Схема установки для определения характеристик профиля деформируемых опорных поверхностей

Установка содержит поперечную раму 1, снабженную опорными колесами 2 и дышлом 3 для буксирования. По концам поперечной рамы 1 над каждым опорным колесом 2 установлены измерительные приспособления, выполненные в виде двух приемников 4 глобальной навигационной системы. На поперечной раме 1 с поперечным шагом  $S$  измерения профиля поверхности в продольно-вертикальной плоскости укреплены продольные рычаги 5 на шарнирах 6, причем каждый продольный рычаг 6 прикреплен к раме 1 шарнирно одним из своих концов. На поперечной раме 1 установлены датчики 7 угла поворота каждого продольного рычага относительно рамы, измеряющие углы  $\alpha$  поворота

каждого продольного рычага 5 относительно поперечной рамы 1 в продольно-вертикальной плоскости.

На свободных концах рычагов 5 установлены оси 8 с возможностью установки на них приспособлений для обеспечения движения, соответствующего профилю поверхности, выполненных в виде имеющих возможность замены съемных колес 9, свободно вращающихся в продольно-вертикальной плоскости. При небольшом угле  $\alpha$  его величина пропорциональна вертикальному перемещению съемного колеса 9 при прохождении неровности опорной поверхности.

Кроме того, на свободных концах рычагов 5 над съемными колесами 9 установлены элементы крепления, выполненные в виде кронштейнов 10, для фиксации на них сменных грузов 11, создающих рабочую нормальную нагрузку на сменные колеса 9.

Установка работает следующим образом. Вначале на оси 8 устанавливаются съемные колеса 9 по конструкции и размерам, соответствующим колесам той мобильной машины, которая будет эксплуатироваться на обследуемой опорной поверхности. Затем на кронштейнах 10 размещаются сменные грузы 11, по весу соответствующие весу, приходящемуся на колесо реальной машины.

Затем производится буксировка установки тягачом при помощи дышла 3. Во время движения при помощи двух приемников 4 глобальной навигационной системы определяются три текущих координаты в пространстве каждой из двух характерных точек поперечной рамы 1, например, крайних точек поперечной рамы 1 на уровне торцов опорных колес 2. Одновременно датчиками 7 записываются значения углов  $\alpha$  поворота каждого продольного рычага относительно рамы.

Разработано устройство для определения угловых перемещений продольных рычагов.

*Предложен бесконтактный способ определения характеристик опорной поверхности (патент РФ № 2162591).*

В условиях сельскохозяйственного производства возникают потребности в контроле форм опорных поверхностей значительных площадей, для которых нежелателен контакт с измерительными элементами, искажающими форму неровностей. При этом требуется высокая производительность и приемлемая точность.

Сущность рассматриваемого способа заключается в том, что на обследуемую поверхность наносят два вида плоских меток, плотно прилегающих к поверхности. Различается два вида меток - эталонные, располагаемые в точках, координаты которых известны, и рабочие, размещаемые на контролируемых участках поверхности тела сложной формы. Используют плоские метки одинаковой формы и размеров. После нанесения меток получают изображение контролируемой поверхности и меток из определенной точки.

Путем сравнения изображений рабочих и эталонных меток, определяют координаты рабочих точек поверхности тела сложной формы, а также ориента-

цию участков этой поверхности, на которых расположены рабочие метки, учитывая угол наклона и направление этого наклона.

При этом по соотношению размеров и формы рабочей метки, полученных при восприятии изображения поверхности тела сложной формы и размеров эталонной метки, определяют вертикальную координату точки поверхности тела относительно горизонтальной базовой поверхности, а по соотношению формы рабочей метки и формы эталонной метки определяют ориентацию участка поверхности этого тела, угол и направление наклона участка указанной поверхности к вертикальной базовой поверхности, перпендикулярной горизонтальной базовой поверхности.

В результате применения данного способа повышается эффективность определения координат точек и ориентации участка поверхности тела сложной формы путем анализа результатов измерения воспринимаемого изображения этой поверхности. Применение данного способа применительно к опорной поверхности поля поясняется рисунком 11.

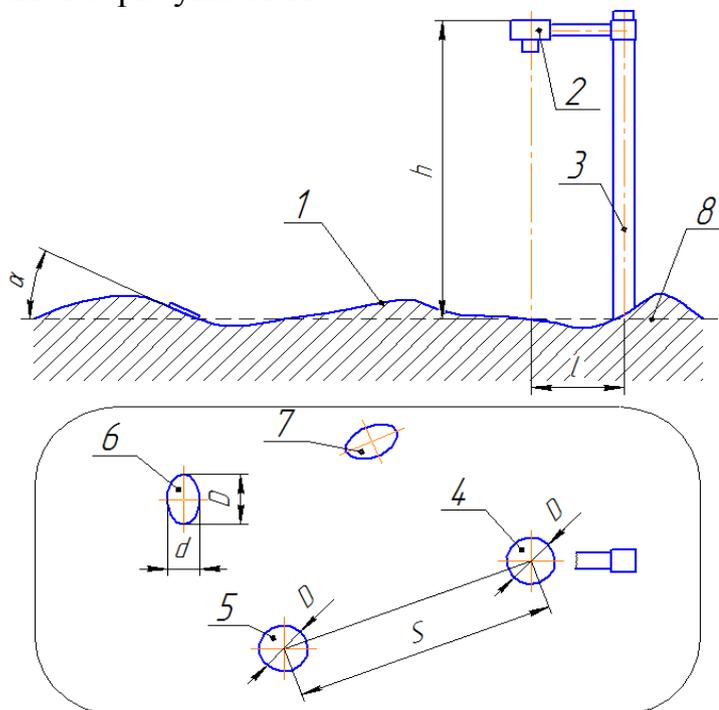


Рисунок 11 – Схема применения бесконтактного способа на поле

Над опорной поверхностью 1 размещена фотокамера 2 при помощи мачты 3. На опорной поверхности размещены две базовых метки 4 и 5. Как минимум одна базовая метка 4 находится в заранее известном месте, например, на базовой плоскости 8 непосредственно под регистрирующей фотокамерой, находящейся на высоте  $h$ , а вторая базовая метка 5 размещается на известном расстоянии  $S$  от первой базовой метки 4 также на базовой плоскости. Кроме того, на опорной поверхности 1 размещены измерительные метки 6 и 7 в произвольных местах

При расстоянии между изображениями базовых меток на снимке, равном  $F$ , коэффициент пропорциональности между размерами на опорной поверхности и на снимке будет равен  $K = S/F$ .

Тогда высота неровности в центре измерительной метки относительно первой базовой метки определится как  $h_u = K(D - D_0)$ ; (3)

где:  $D$  – диаметр или величина большой оси эллипса на полученном изображении измерительной метки;  $D_0$  – диаметр или величина большой оси эллипса на полученном изображении базовой метки.

При известной величине диаметра метки, равном  $D$ , величина большой оси эллипса на изображении метки находящейся на опорной поверхности будет равна также  $D$ . Величина малой оси эллипса будет равна  $d = D \cos \alpha$ ; где  $\alpha$  – угол наклона опорной поверхности к горизонтальной базовой плоскости, следовательно  $\alpha = \arccos(d/D)$ .

Сравним параметры, определяющие наклон опорной поверхности в точке центра измерительной метки, полученные при измерениях с нивелиром и рейкой и рассматриваемым способом (рисунок 12).

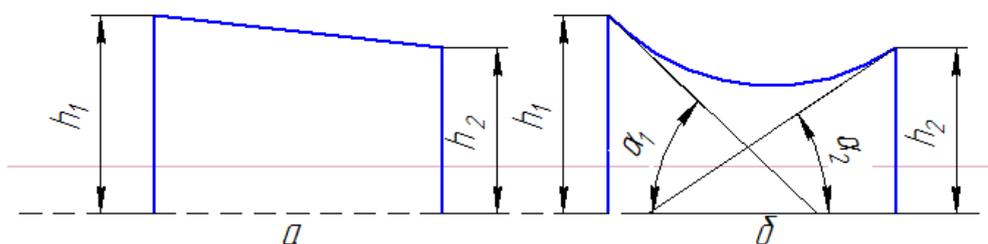


Рисунок 12 - Определение формы поверхности между двумя точками

В первом случае будут известны только координаты точки центра, также, как и соседних точек. Во втором случае расположение опорной поверхности между двумя смежными метками более определено, поскольку направление наклона задано углом  $\alpha$ .

*Определена возможность применения спутниковых радионавигационных систем для определения характеристик профиля опорных поверхностей. Основным препятствием для такого применения является трудность обеспечения необходимой точности. Наиболее часто для этого в настоящее время применяются сложные и дорогостоящие дифференциальные навигационные измерения.*

Для повышения точности измерений был рассмотрен способ по патенту РФ № 2288451. В этом случае повышение точности обеспечивается за счет применения не менее трех приемников спутниковых навигационных систем, антенны которых расположены на жестких штангах и размещены вне габаритов мобильной машины.

**В четвертой главе** приведены методики и результаты экспериментальных исследований.

*Определено влияние параметров зависимой подвески и рулевого привода на неуправляемый поворот колес. Эксперименты проводились на примере двух мобильных машин – трехосного автомобиля с бортовой платформой КамАЗ-5320 и седельного тягача FORD-9000. Измерение положения элементов подвески, рулевого привода и колес определялось относительно среднего положения, при номинальной нагрузке, а затем – при разгрузке и нагружении. Нагружение производилось при помощи гидравлического домкрата через механический динамометр сжатия.*

Результаты измерений показали, что геометрические размеры элементов подвески и рулевого привода близки у обеих машин. Изменения взаимного положения при различных видах нагружения подвески оказались близки к расчетным, полученным в главе 2. Установлено наличие взаимной компенсации различных отклонений при нагружении подвески, что свидетельствует о рациональном выборе конструктивных параметров подвески и рулевого привода.

Произведено определение характеристик профиля поля мобильной универсальной установкой. Разработаны методика проведения измерений и обработки результатов. На рисунке 13 приведена форма одного из профилей, полученных при испытаниях.

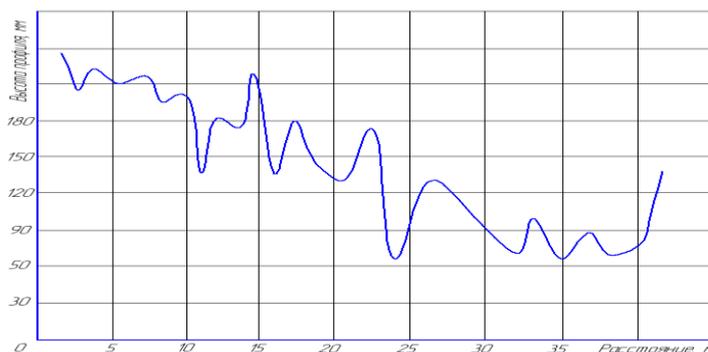


Рисунок 13 – Форма профиля №1

Экспериментальное определение формы профиля опорной поверхности бесконтактным способом производилось на участке поля сельскохозяйственного назначения. Были использованы нумерованные бумажные метки в виде круга диаметром 0,2 м в количестве 100 штук. Участок поля имел площадь около 50 м<sup>2</sup>. Метки располагались равномерно на поверхности с шагом около 0,5 м (рисунок 14) в 10 рядов по 10 меток в ряду.

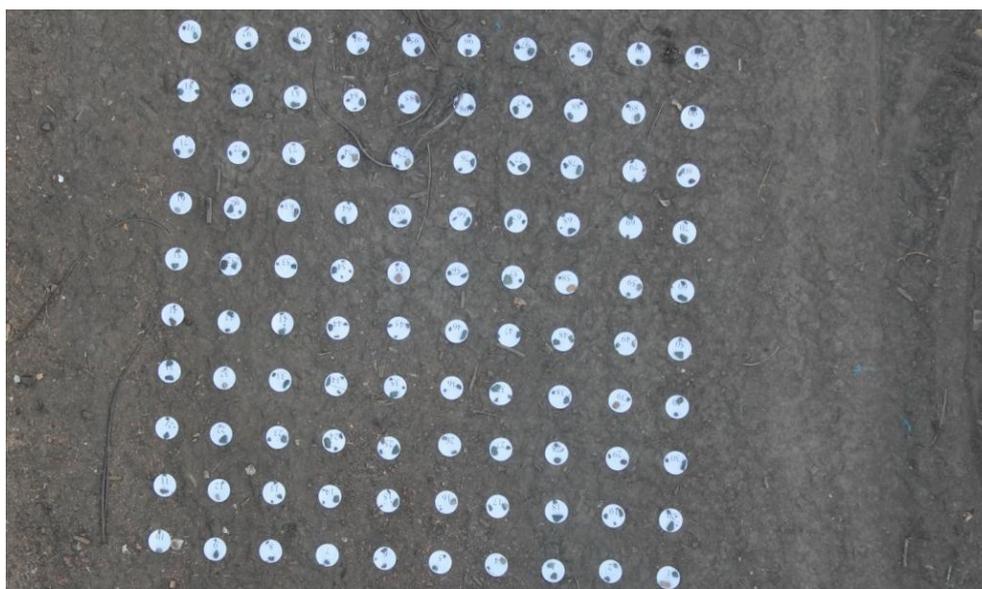


Рисунок 14 - Пример размещения меток на контрольном участке

Для фотографирования применялась профессиональная зеркальная цифровая камера с достаточно высокой разрешающей способностью – 18 Мрпс. Объектив соответствовал требованиям объектива – анастигмата. Камера устанавливалась по уровню в горизонтальной плоскости на мостовом кране, на высоте 21 метр от базовой плоскости. Базовая метка располагалась непосредственно под камерой, положение определялось при помощи отвеса.

Для обработки полученных изображений были применены специальные программы для персонального компьютера.

Для обработки экспериментальных данных, полученных путем восприятия исследуемой поверхности с помощью оптического прибора, применялась программа на языке c-Sharp, входными величинами которой являются координаты центров меток и осей эллипсов, полученные в результате съемки, а выходными - координаты поверхности расположения меток.

В ходе программирования была осуществлена разработка и реализация алгоритмов анализа характеристик поверхностей по их фотографиям. Эти характеристики представляют собой координаты центров проекций меток, нанесенных на поверхность детали, на плоскость фотографии.

На рисунке 15 представлен пример результата измерений.

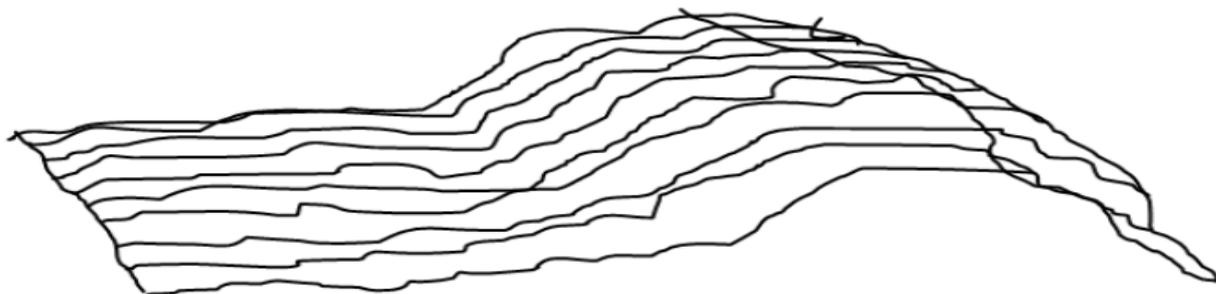


Рисунок 15 – Пример формы участка опорной поверхности по результатам измерений

*Возможность повышения точности работы спутниковых навигационных систем определялась в серии экспериментов.* Определялись параметры работы приемников спутниковой навигации, размещенных на измерительной установке на выносных штангах по окружности в соответствии с рисунком 16.

Общий вид экспериментальной установки приведен на рисунке 17.

Было установлено, что параллельном измерении одного и того же параметра несколькими приемниками имеет возможность выделения систематической погрешности, близкой к одинаковой у всех приемников. За счет этого можно увеличить точность измерения параметра.

Применительно к процессу измерения высот нервноностей профиля опорной поверхности в этом случае целесообразно проводить оценку изменения высот не в абсолютном виде, а относительно горизонтальной плоскости, средней для всех используемых приемников радионавигационной системы.

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показало различие в 5...12%, что можно считать приемлемым.

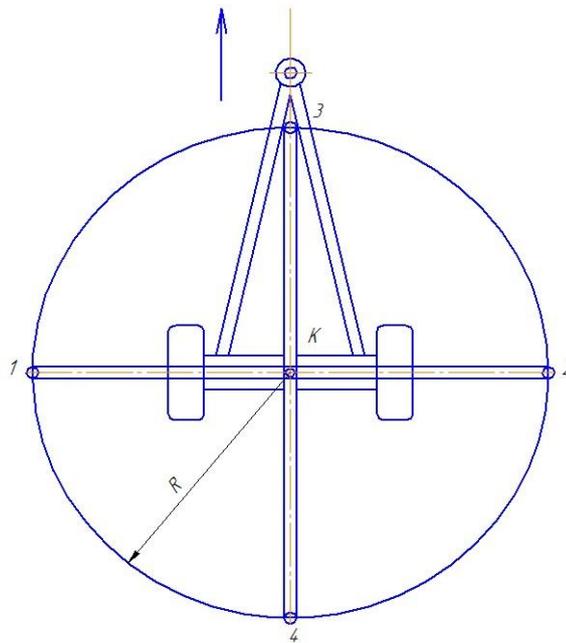


Рисунок 16 – Размещение штанг и датчиков на измерительной установке



Рисунок 17 – Комплект измерительных штанг в эксперименте

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Форма профилей опорных поверхностей в сельскохозяйственном производстве оказывает существенное влияние на эксплуатационные показатели мобильных машин, условия работы механизаторов, качество выполняемых технологических операций. Для достоверной оценки величин неровностей предложены более эффективные по сравнению с существующими способы и устройства. При необходимости получения более точных размеров неровностей, получаемых непосредственным способом измерения, рекомендуется применение мобильной универсальной установки, контактирующей с большим количеством контрольных точек. При движении с постоянной скоростью периодически измеряются не

только высоты профиля, но и твердость почвы при помощи зондов с высокой производительностью.

2. В случае необходимости контроля профиля опорных поверхностей значительных площадей целесообразно применение бесконтактного косвенного способа, основанного на анализе фотоизображения. Учет деформации опорной поверхности при прохождении мобильной машины учитывается в двух случаях – в косвенном способе при использовании мобильной машины в качестве измерительной динамической системы и в мобильной установке с нагружаемыми измерительными колесами. Проведенные исследования показали перспективность применения приемников спутниковых навигационных систем для измерения показателей как микропрофиля, так и макропрофиля. Определены мероприятия по повышению точности измерений. Полученные технические решения защищены охранными документами.

3. Получены аналитические зависимости, определяющие вертикальные перемещения отдельных точек мобильной машины при движении через неровность, что позволяет, например, оценить изменение заглубления рабочих органов.

4. Неуправляемый поворот колес мобильной машины при движении по неровности может быть оценен по деформации упругих элементов подвески. Определено влияние деформации упругих элементов и конструктивных параметров подвески и рулевого привода на угол поворота (на примере зависимой подвески с продольными рессорами). Полученные зависимости позволяют произвести рациональное сочетание параметров микропрофиля опорной поверхности и конструктивных параметров мобильной машины.

5. Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность предложенных в работе способов контроля и расчета и принятых конструктивных решений.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

**В изданиях по перечню ВАК**

1. Павлюк, А.С. Влияние неровностей опорной поверхности на поворот колес мобильной машины/ А.С. Павлюк, **С.В. Сафронов** // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – № 6 (92). С. 95-99.

2. Павлюк, А.С. Влияние неровностей опорной поверхности на направление движения колесной машины /А.С. Павлюк, **С.В. Сафронов** //Ползуновский вестник. 2012. - № 1/1. С. 232-238.

3. Павлюк, А.С. Применение способа определения координат точек и ориентации участков поверхности тела сложной формы для определения профиля земной поверхности /А.С. Павлюк, А.С. Баранов, **С.В. Сафронов** // Ползуновский вестник. 2012. - № 3/1. С. 207-214.

**Патент РФ**

4. Пат. 2468142. Российская Федерация, МПК<sup>7</sup>С1 Е01С, 23/07(2006.01). Установка для определения характеристик профиля деформируемых опорных

поверхностей. / А.С Павлюк., **С.В. Сафронов**; заявитель и патентообладатель: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. - № 2011113031/03; заявл. 05.04.2011; опубл. 27.11.2012. Бюл. №33. – 6 с.

#### **В других изданиях**

5. Павлюк, А.С. Определение профиля земной поверхности /А.С. Павлюк, А.С. Баранов, **С.В. Сафронов** // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы. Материалы II-й Всероссийской научно-технической конференции 23-24 ноября 2012 г. /Под ред. к.т.н. доцента А.В. Шашка/ Рубцовский индустриальный институт. - Рубцовск. 2012. – С. 47 – 54.

6. Павлюк, А.С. Влияние неровностей опорной поверхности на колебания звеньев машинно-тракторного агрегата/А.С. Павлюк, **С.В. Сафронов**// Повышение экологической безопасности автотракторной техники: сб. статей; под ред. д.т.н. профессора, академика РАТ А.Л. Новоселова/ Российская академия транспорта, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. - Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2011. – С. 97-101.

7. **Сафронов, С.В.** Методика определения характеристик микропрофиля поля при движении при движении машинно-тракторного агрегата / С.В. Сафронов, А.С. Павлюк // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: сб. статей; под ред. д.т.н. профессора, академика РАТ А.Л. Новоселова/ Российская академия транспорта, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. - Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2011. – С. 85-89.

8. Установка для определения характеристик рельефа опорной поверхности при движении мобильных машин/А.С. Павлюк, **С.В. Сафронов** //Научное творчество студентов и сотрудников автотранспортного факультета. Сборник тезисов и докладов 68-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава. Часть 2 Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. - Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2010. – С. 23-26.

9. Павлюк, А.С. Применение глобальных навигационных систем для снятия профилограмм поверхностей /А.С. Павлюк, **С.В. Сафронов** //Научное творчество студентов и сотрудников автотранспортного факультета. Сборник тезисов и докладов 68-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава. Часть 2 Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. - Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2010. – С. 26-27.

10. **Сафронов, С.В.** Бесконтактный способ определения характеристик микропрофиля опорной поверхности /С. В. Сафронов, А.С. Павлюк //Научное творчество студентов и сотрудников факультета энергомашиностроения и автомобильного транспорта. Сборник тезисов и докладов. 69-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава технического университета. Часть 1 Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова.- Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2011. – С. 5-7.

11. **Сафронов, С.В.** Влияние неровностей опорной поверхности на колебания мобильной машины/С. В. Сафронов, А.С. Павлюк //Научное творчество студентов и сотрудников факультета энергомашиностроения и автомобильного транспорта. Сборник тезисов и докладов. 69-я научно-техническая конферен-

ция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава технического университета. Часть 1 Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова.- Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2011. – С. 7-9.

12. **Сафронов, С.В.** Взаимодействие колес мобильной машины с неровностями опорной поверхности/ С.В. Сафронов, А.С. Павлюк // Научное творчество студентов и сотрудников факультета энергомашиностроения и автомобильного транспорта. Сборник тезисов и докладов. 70-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава технического университета. Часть 1 Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова.- Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2012. – С. 10-11.

13. **Сафронов, С.В.** Определение макропрофиля опорной поверхности при помощи спутниковой навигации/ С.В. Сафронов, Д.С. Митрофанов, А.С. Павлюк // Научное творчество студентов и сотрудников факультета энергомашиностроения и автомобильного транспорта. Сборник тезисов и докладов. 70-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава технического университета. Часть 1 Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. - Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2012. – С. 15-17.

14. **Сафронов, С.В.** Повышение устойчивости движения колесной мобильной машины по неровностям опорной поверхности / С.В. Сафронов, А.С. Павлюк// Научное творчество студентов и сотрудников факультета энергомашиностроения и автомобильного транспорта. Сборник тезисов и докладов. 70-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава технического университета. Часть 1 Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. - Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2012. – С. 20-22.

15. **Сафронов, С.В.** Определение параметров профиля опорной поверхности, взаимодействующей с колесами мобильной машины /С.В. Сафронов, А.С. Павлюк //Научное творчество студентов и сотрудников факультета энергомашиностроения и автомобильного транспорта. Сборник тезисов и докладов. 71-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава технического университета. Часть 1 Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова.- Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2013. – С.12-14.

Подписано в печать 21.10.2013. Формат 60x84 1/16.

Печать – цифровая. Усл.п.л. 1,39.

Тираж 100 экз. Заказ 2013 – 414.

Отпечатано в типографии АлтГТУ,

656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

тел.: (8–3852) 29–09–48

Лицензия на полиграфическую деятельность

ПЛД №28–35 от 15.07.97 г.