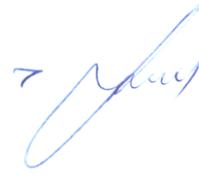


На правах рукописи



АРТЕМЕНКО Максим Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ МАНЕВРЕННОСТИ
РОБОТИЗИРОВАННОГО
ДОРОЖНОГО КАТКА**

**Специальность 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические
средства и комплексы**

АВТОРЕФЕРАТ

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

Омск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)».

Научный руководитель:

КОРЧАГИН Павел Александрович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», проректор по научной работе и цифровой трансформации (г. Омск).

Официальные оппоненты:

МОЛЕВ Юрий Игоревич

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Строительные и дорожные машины» (г. Нижний Новгород).

ТЮРЕМНОВ Иван Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины (г.Ярославль)».

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Защита состоится «24» января 2024 г. в 10:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета ВАК РФ 99.2.109.02, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения «Омский государственный технический университет» и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» по адресу: 644080, г. Омск, проспект Мира, 5, ауд. 2.318. Тел. (3812) 65-03-23, e-mail: iateterina@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СибАДИ» и на сайте университета по адресу: <https://sibadi.org/about/units/institut-magistrature-i-aspirantury/studies/dissertations/67057/>; в библиотеке ФГАОУ ВО «ОмГТУ» и на сайте университета по адресу: https://www.omgtu.ru/scientific_activities/dissertatsionnye_sovety/obyavleniya_o_zashchite_dissertatsiy_i_dokumenty_k_nim/artemenko-m-n/.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, проспект Мира, 5, ауд. 1.107. Тел. (3812) 65-03-23, e-mail: iateterina@mail.ru.

Автореферат разослан «20» ноября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Тетерина
Ирина Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Увеличение объемов и темпов строительства, в том числе и дорожного, значительная конкуренция на мировом рынке строительной техники и технологий – все это, наряду с острой необходимостью развития отечественной транспортной инфраструктуры, обуславливает необходимость разработки и создания новых видов высокопроизводительной дорожной техники и технологий строительства.

Ввиду этого совершенствование и модернизация являются, несомненно, необходимым условием развития дорожного строительства.

Одной из составляющих модернизации, наряду с введением новых технологий, выступает роботизация производства – создание роботизированных строительно-дорожных машин (СДМ).

Основными критериями целесообразности их создания будут: увеличение производительности, повышение качества работ, снижение эксплуатационных расходов.

Степень разработанности темы исследования. Наибольшая часть исследований и работ в области создания мобильных роботов, машин, в том числе и СДМ, отечественными учеными проводилась в Институте проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, Институте машиноведения им. А.А. Благонравова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НГТУ, МАДИ, МАИ, ЮФУ, АлтГТУ, ТПУ, СибАДИ, БрГУ и др. В исследование темы внесли вклад ученые: А.Л. Кемурджиан, Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов, Ю.Ф. Голубев, Ф.Л. Черноусько, Н.Н. Болотник, В.Г. Градецкий, В.Е. Павловский, К.А. Артемьев, И.А. Анохин, Т.В. Алексеева и др.

Диссертационная работа соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 2.5.11 «Наземные транспортно-технологические средства и комплексы» п.5 – Математическое моделирование рабочих процессов транспортно-технологических средств при взаимодействии с опорной поверхностью и рабочими средами, п.6 – Оптимизация конструкций и синтез законов управления движением наземных транспортно-технологических средств и их комплексов.

Объект исследования – процесс управления движением дорожного катка по уплотняемой поверхности.

Предмет исследования – закономерности, связывающие характеристики маневренности роботизированного дорожного катка с его конструктивными и эксплуатационными параметрами.

Цель диссертационной работы – разработка научно обоснованных рекомендаций по выбору параметров катка и системы управления, влияющих на маневренность роботизированного дорожного катка.

Задачи исследования:

1. Выбрать и обосновать критерий эффективности маневренности роботизированного дорожного катка.

2. Разработать математическую модель сложной динамической системы «рабочая среда – дорожный каток – система управления».

3. Выявить функциональные зависимости параметров, характеризующих маневренность роботизированного дорожного катка, от его конструктивных и эксплуатационных параметров.

4. Разработать методику выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров, алгоритм работы системы управления

роботизированного дорожного катка, обеспечивающих требуемые параметры движения катка.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Выявлены функциональные зависимости параметров, характеризующих траекторию движения катка: дистанции перестроения и смещения поворотного вальца при перестроении, дистанции и интервала разворота, величины смещения поворотного вальца при развороте от конструктивных и эксплуатационных параметров машины.

2. Разработана математическая модель динамической системы «рабочая среда – дорожный каток – система управления», позволяющая проводить моделирование работы системы управления, исследовать движение катка по уплотняемой поверхности.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработан алгоритм работы системы управления дорожного катка, обеспечивающий движение катка по заданной траектории с требуемой точностью. Данный алгоритм может быть использован при создании системы управления роботизированного дорожного катка предприятиями, занимающимися проектированием и производством дорожной-строительной техники.

Впервые получены функциональные зависимости дистанции перестроения и смещения поворотного вальца при перестроении, дистанции и интервала разворота, величины смещения поворотного вальца при развороте, которые позволяют провести на этапе проектирования предварительную оценку маневренных характеристик катка на соответствие требований технического задания на его разработку.

Разработана методика выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров, обеспечивающих необходимые параметры траектории движения катка: дистанцию перестроения и смещения поворотного вальца при перестроении, дистанцию и интервал разворота, величины смещения поворотного вальца при развороте.

Методология и методы исследования. В данной диссертационной работе в качестве общего подхода принята методология системного анализа. В работе использовались методы математического и имитационного моделирования, теория планирования эксперимента, численного решения алгебраических и дифференциальных уравнений, теории автоматического управления, математической статистики. Исследования содержат теоретические и экспериментальные разделы. Исследования носят комплексный характер, содержат теоретические и экспериментальные разделы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель сложной динамической системы «рабочая среда – дорожный каток – система управления».

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований движения дорожного катка по уплотняемой поверхности.

3. Функциональные зависимости параметров, характеризующих траекторию движения катка от конструктивных и эксплуатационных параметров машины.

4. Методика выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров, обеспечивающих необходимые параметры траектории движения катка.

Степень достоверности обеспечена корректностью допущений, применением математического моделирования в качестве основного инструмента исследования, достаточным количеством экспериментальных исследований.

Апробация результатов работы. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на II Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» ФГБОУ ВО «СибАДИ», г.Омск, 2017; III Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» ФГБОУ ВО «СибАДИ», г.Омск, 2018; VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых» ФГБОУ ВО «СибАДИ», г.Омск, 2022; V Национальная научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство» ФГБОУ ВО «СибАДИ», г.Омск, 2022; XXVI Международной научно-технической конференции «ИНТЕРСТРОЙМЕХ – 2022» ФГБОУ ВО «ЯГТУ», г.Ярославль, 2022.

Реализация результатов работы. Результаты научных исследований внедрены в ООО «Завод дорожных машин» (г. Рыбинск Ярославская область) и учебный процесс ФГБОУ ВО «СибАДИ».

Публикации. По результатам исследований опубликованы 8 печатных работ, в том числе 5 статей в сборниках материалов научных конференций, 3 статьи в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки РФ.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем 157 страниц, включая 66 рисунков, 3 таблицы и 3 приложения. Список литературы содержит 122 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цель и основные задачи исследования, сформулированы научная новизна, практическая ценность работы и основные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ работ выполняемых строительными и дорожными машинами при строительстве автомобильных дорог: установлена зависимость траектории движения СДМ от вида и назначения машины, технологии выполняемых работ; определен критерий эффективности, характеризующий маневренность роботизированного дорожного катка на основании требований, предъявляемых нормативно-технической документацией и правилами проведения работ для машин данного вида; представлены классификация, назначение, общее устройство существующих роботизированных систем управления (СУ); проведены анализ элементов СУ роботизированных дорожных машин, их классификация, состав, назначение, предложены роботизированная СУ для внедрения в конструкцию дорожного катка ДУ-107, ее состав, характеристики; произведен обзор предшествующих работ в области моделирования роботизированных СДМ.

Технология большинства операций, выполняемых СДМ, а так же требования нормативно-технической, научной документации предполагают при проведении работ строительными машинами выполнение и повторение типовых прямолинейных и (или) криволинейных движений, проходов по одному и тому же маршруту, по параллельным, пересекающимся, замкнутым маршрутам и т.д. (рис.1). Действие строительной машины – в строго ограниченных пределах.

Как пример можно привести работу катков по уплотнению асфальтобетонных смесей, когда высокое качество работ достигается за счет необходимого количества проходов катка определенной массы (см. рисунок 1).

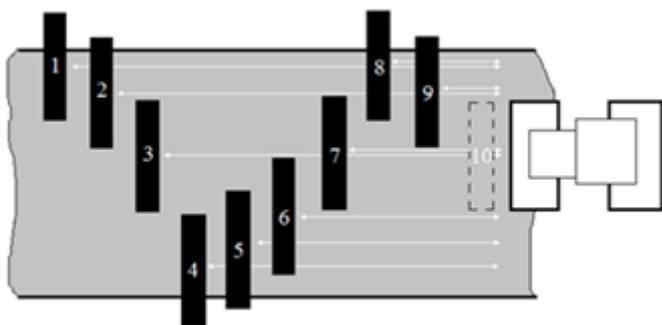


Рисунок 1 – Схема движения дорожного катка при выполнении работ по уплотнению асфальтобетонных покрытий.

Анализ нормативной документации, устанавливающей требования к качеству работ, выполняемых дорожными катками, показал, что повышение производительности и качества работ, выполняемых дорожным катком, может быть достигнуто за счет планирования требуемой траектории движения, минимизации некоторых ее параметров и обеспечения позиционирования катка с установленной СП 78.13330.2012

точностью, и представляет критерий эффективности характеризующий маневренность роботизированного дорожного катка в виде критерия:

$$x_{\text{оп}} \rightarrow \min; y_{\text{ин}} = y_{\text{тр}} \pm \Delta,$$

где $x_{\text{оп}}$ – дистанция перестроения на параллельную полосу уплотнения; $y_{\text{ин}}$ – интервал перестроения на параллельную полосу уплотнения; $y_{\text{тр}}$ – расчетный интервал перестроения.

Для реализации системы управления на базовом дорожном катке, после проведенного анализа существующих роботизированных СУ была выбрана система автопилотирования (СА) (рисунок 2).



Рисунок 2 – Структурная схема системы автопилотирования

В качестве примера СДМ для описания прототипа роботизированной системы управления был взят дорожный каток вибрационный трехосный трехвальцовый с гладкими жесткими вальцами с задним поворотным вальцом ДУ-107

Реализация СА возможна внедрением в состав базового катка:

-управляющей системы, реализующей алгоритмы управления, на основании заложенных программ и анализа данных, полученных от элементов информационной системы, системы навигации и позиционирования;

- системы навигации и позиционирования, поставляющей управляющей системе текущие данные о скорости машины и ее текущих координатах;

- информационной системы, поставляющей управляющей системе информацию о текущем положении органов управления. При этом виды работ, выполняемые ДУ-107, организация технологического процесса, условия выполнения работ позволяют отказаться от использования внешней информационной системы;

- исполнительной системы, оказывающей расчетные воздействия на органы управления.

Примерный состав и схема размещения СА на базовом катке показаны на рисунке 3.

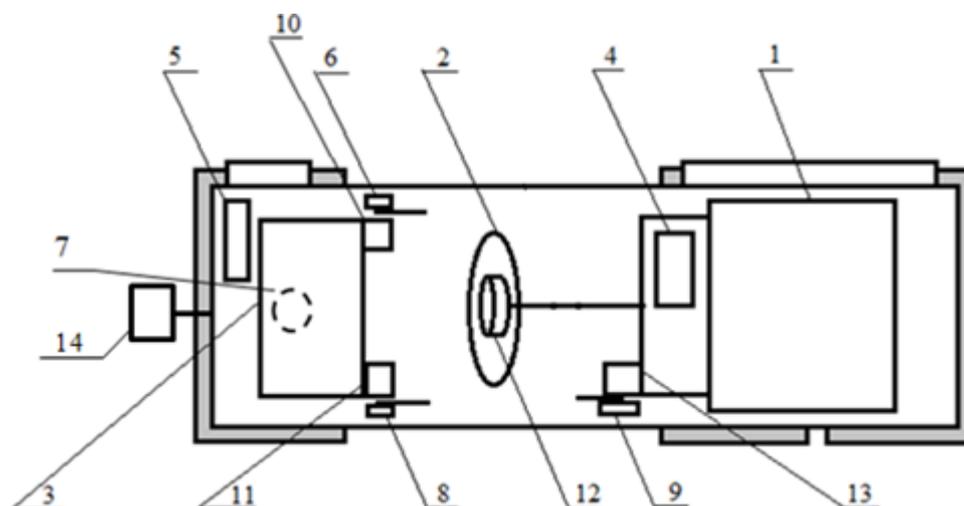


Рисунок 3 – Схема размещения элементов роботизированной системы управления на машине (вид сверху):

1 – силовая установка; 2 – руль; 3 – рабочее место (сиденье) оператора; 4 – управляющий компьютер; 5 – GPS-ГЛОНАСС приемник; 6 – датчик положения рычага стояночного тормоза; 7 – датчик поворота поворотного вальца; 8 – датчик положения рычага механизма реверса; 9 – датчик положения рукоятки регулировки подачи топлива; 10 – электропривод стояночного тормоза; 11 – электропривод рычага реверса; 12 – электропривод руля; 13 – электропривод рукоятки регулировки подачи топлива; 14 – георадар

Во второй главе описаны общая методика исследования, методика теоретических исследований, методика экспериментальных исследований, применяемых в работе.

В качестве общей методики для решения задач, поставленных в диссертационной работе, используется метод системного анализа, который заключается в последовательном установлении структурных связей между постоянными и (или) переменными элементами (объектами) исследуемой системы, и которым опирается на сочетание общенаучных, статистических, математических и

экспериментальных методов. В соответствии с данным методом роботизированная СДМ рассматривается в виде сложной системы моделей, являющейся совокупностью отдельных взаимосвязанных подсистем, объединенных причинно-следственными связями. Такими подсистемами будут являться «роботизированная система управления», «СДМ», «рабочая среда».

В третьей главе представлена математическая модель роботизированного дорожного катка, являющаяся совокупностью моделей, описывающих элементы подсистем, упорядоченно взаимодействующих между собой, при этом выходные данные одной модели являются входными для другой.

Силы сопротивления активной области рабочей среды при взаимодействии с рабочими органами дорожного катка, являются входными данными для модели катка, рассмотренной как подсистема «опорная поверхность – каток» (рисунок 4) и позволяют определить силы сопротивления движению катка:

$$P_w = P_{w1} + P_{w2} + P_{w3}, \quad (1)$$

где P_{w1} – сопротивление, вызванное силами инерции; P_{w2} – сопротивление перекачиванию катка по дороге, с учетом преодоления уклонов; P_{w3} – сопротивление, возникающие при движении на криволинейных участках.

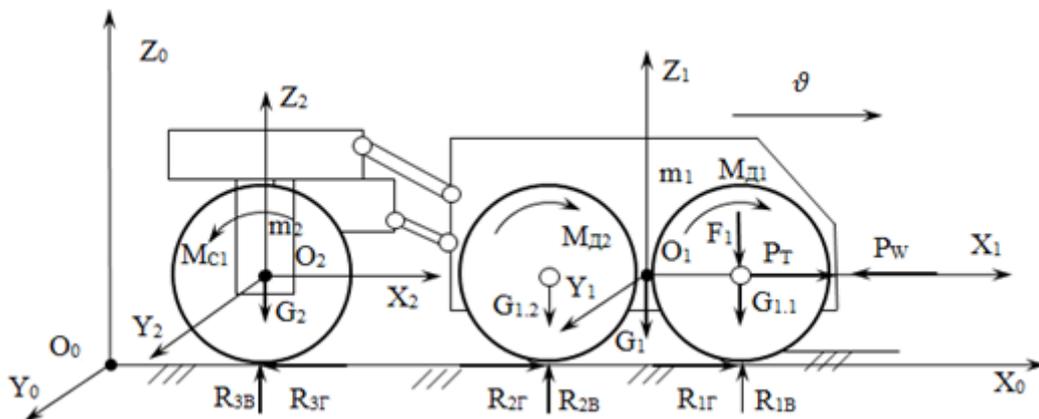


Рисунок 4 – Расчетная схема катка

Силы, оказывающие сопротивление движению рассчитываются по формулам:

$$P_{w1} = (m_1 + m_2) \frac{\vartheta}{t_p} \varepsilon; \quad (2)$$

$$P_{w2} = G (k_{СП} + k_Y); \quad (3)$$

$$P_{w3} = k_C G_3. \quad (4)$$

Данные соотношения позволяют, при варьировании параметрами рабочей среды получать значения ускорения и скорости машины в любой момент времени, производить расчеты разгона и торможения.

Расчетная схема поворота дорожного катка представлена на рис.5. Основным параметром, определяющим траекторию движения является средний радиус поворота r_{cp} , зависящий от конструктивных и эксплуатационных параметров машины:

$$r_{cp} = L \cdot \text{ctg}\varphi. \quad (5)$$

Получены выражения, позволяющие определять траектории движения характерных точек машины:

радиус поворота ведущего вальца $r_{\theta 1}$:

$$r_{\theta 1} = \sqrt{(AC^2 + (L \cdot \text{tg}\psi)^2)}; \quad (6)$$

радиус поворота среднего вальца $r_{\theta 2}$:

$$r_{\theta 2} = \sqrt{(AD^2 + (L \cdot \text{tg}\psi)^2)}; \quad (7)$$

радиус поворота поворотного вальца $r_{в3}$:

$$r_{в3} = L / \cos\varphi = L / \sin\psi. \quad (8)$$

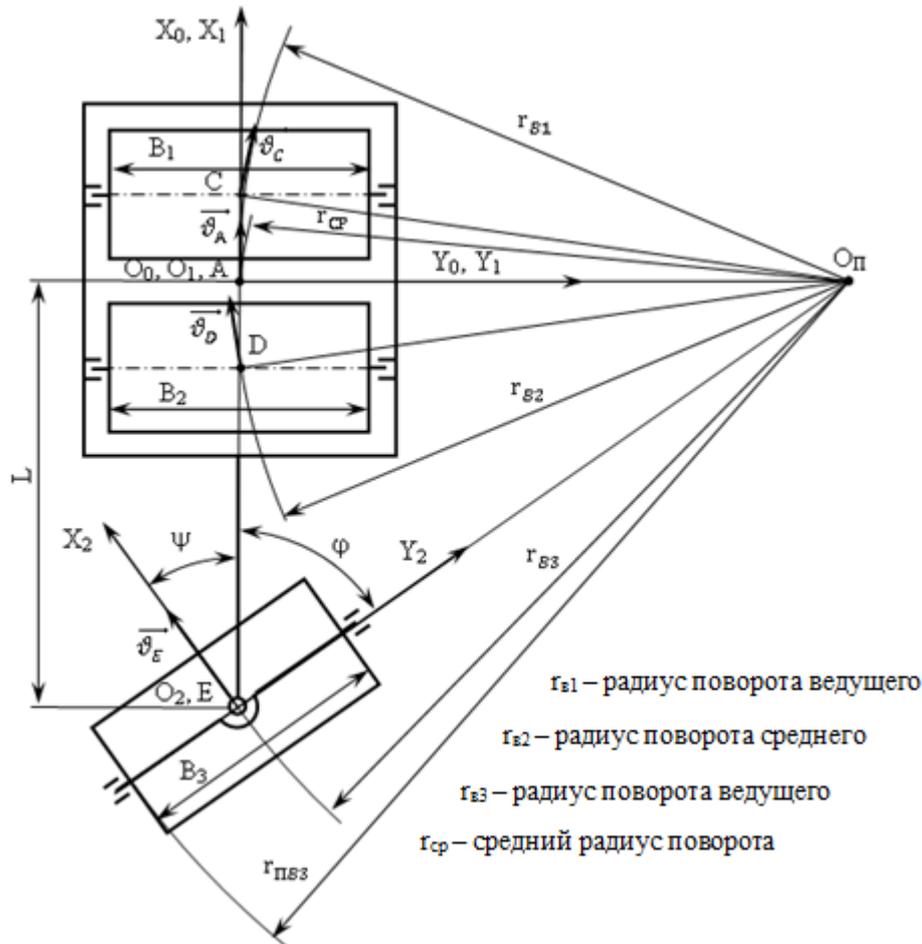


Рисунок 5 – Расчетная схема поворота катка

Таким образом, получены зависимости траекторий движения характерных точек расчетной схемы при движении катка при повороте в зависимости от геометрических размеров элементов катка и обобщенной координаты, определяющей угол поворота поворотного вальца, а также угла поворота руля.

Алгоритм работы системы управления позволяет на основе полученных зависимостей и закономерностей движения машины осуществлять управление курсом и скоростью машины. Данный алгоритм выполнен в виде блок-схемы (рисунок б).

Алгоритм описывает процесс управления роботизированным дорожным катком, его силовой установкой, органами управления с целью реализации движения машины с заданной скоростью по заданной траектории.

Представленный фрагмент описывает работу СУ при контроле и коррекции курса и скорости в момент движения машины по заданной траектории и с заданной скоростью.

Разработанный алгоритм позволяет программировать систему управления и осуществлять движение роботизированному дорожному катку с заданной скоростью по любой заданной траектории, обеспечивающейся конструктивными и эксплуатационными параметрами машины.

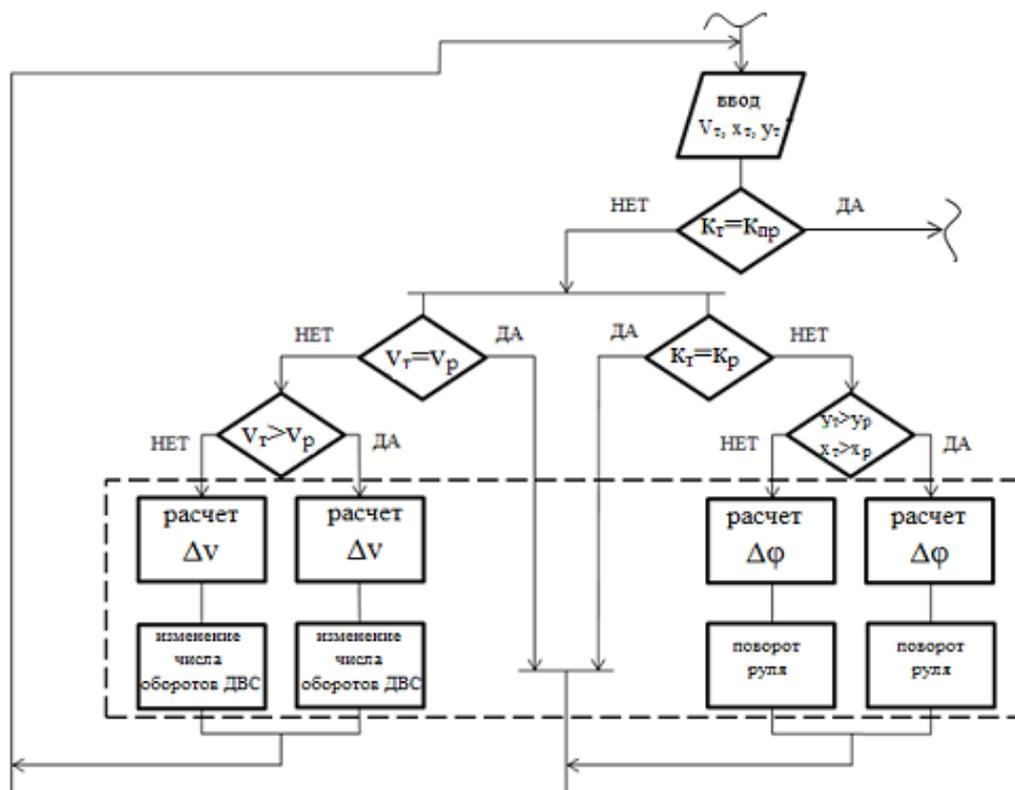


Рисунок 6 – Фрагмент алгоритма работы роботизированной СУ дорожного катка

Модель рабочей среды (уплотняемого материала) описывает процессы и силы, возникающие в активной области рабочей среды при взаимодействии с рабочими органами машины.



Рисунок 4 - Схематичное представление модели активной области уплотняемого слоя при взаимодействии с вальцом

Рисунок 7 – Схематичное представление модели активной области уплотняемого слоя при взаимодействии с вальцом дорожного катка

Расчет сил сопротивления и жесткостей для пластической и упругой деформации, вязкого сопротивления активной области, силы сопротивления сухого трения рабочей среды, при взаимодействии с вальцом катка получен из выражений, предложенных В.В. Михеевым, С.В. Савельевым:

$$F_{\text{деф}} = (c_{\text{пл}}(z)\theta(\dot{\sigma}) + c_{\text{упр}}(z))\theta(\sigma_{\text{пл}}), \quad (9)$$

$$F_{\text{вязк}} = b(z)\dot{z}, \quad (10)$$

$$F_{\text{тр}}(t) = S_{\text{cont}}(t)\sigma_{\text{пл}}. \quad (11)$$

Силы сопротивления активной области рабочей среды при взаимодействии с рабочими органами дорожного катка (рисунок 7) являются входными данными для модели катка, рассмотренной как подсистема «опорная поверхность – каток» (см. рисунок 4).

Таким образом, разработана математическая модель роботизированного дорожного катка, представляющая собой совокупность моделей подсистем входящих в сложную динамическую систему «рабочая среда – дорожный каток – система управления».

Математические модели подсистем учитывают и описывают силы и моменты, возникающие в уплотняемом материале при взаимодействии с рабочими органами катка, динамические свойства и особенности машины, позволяющие производить расчеты скорости, ускорений катка, траектории его движения. Модель системы управления, представленная в виде алгоритма работы системы, на основе входящих данных моделей других подсистем описывает процесс управления роботизированным дорожным катком, его силовой установкой, органами управления с целью реализации движения машины с заданной скоростью по заданной траектории.

В четвертой главе представлены основные результаты теоретических исследований процесса движения роботизированного дорожного катка по уплотняемой поверхности, порядок проведения вычислительного эксперимента, установлены закономерности, связывающие характеристики траектории движения дорожного катка с конструктивными и эксплуатационными параметрами машины.

Проведенный в предыдущих главах анализ работ, выполняемых дорожными катками при уплотнении дорожных покрытий, позволил определить основные виды маневров выполняемых машиной.

К ним относятся:

- перестроение на параллельный курс и прямолинейное движение (вперед – назад), при уплотнении полос дорожного покрытия (рисунок 8);
- перестроение на параллельный обратный курс (разворот) (рисунок 9).

Выделены основные параметры, характеризующие траекторию движения. К ним относятся: дистанция перестроения на параллельный курс $x_{\partial n}$ (м), дистанция разворота $x_{\partial p}$ (м), интервал перестроения на параллельный курс y_{un} (м), интервал перестроения на параллельный курс при развороте y_{up} (м), смещение поворотного вальца при перестроении Δy_n (м), смещение поворотного вальца при развороте Δx_p и Δy_p (м).

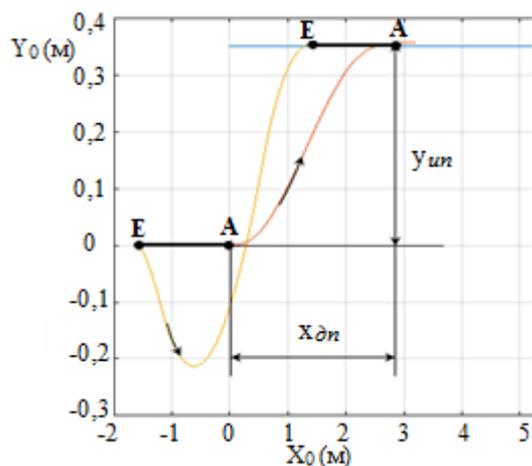


Рисунок 8 – Дистанция $x_{\partial n}$ и интервал y_{un} при параллельном перестроении на смежную полосу

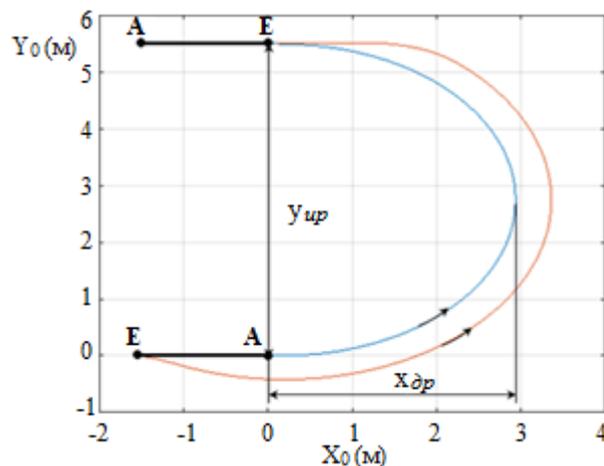
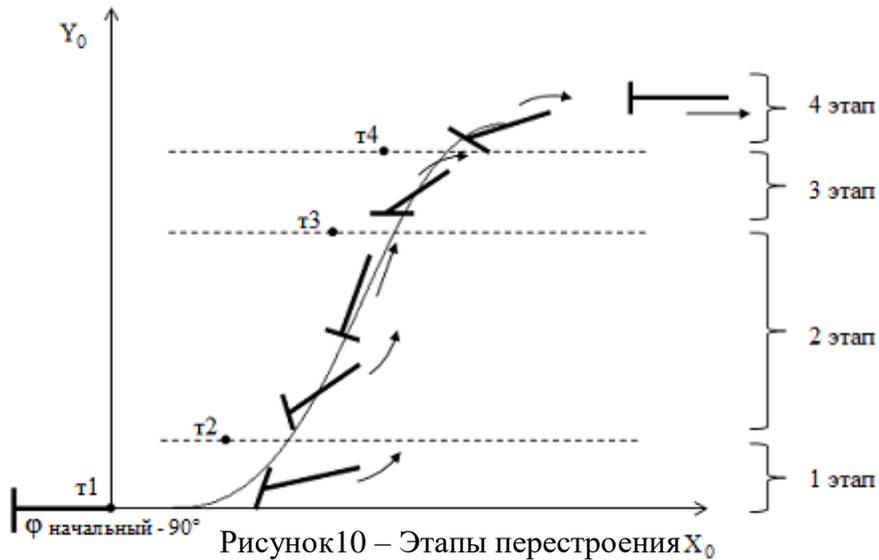


Рисунок 9 – Дистанция $x_{\partial p}$ и интервал y_{up} при развороте катка на обратный курс

Был исследован процесс выполнения маневра перестроения дорожного катка на параллельный курс на заданный интервал. Выделены четыре основных этапа перестроения. Введено понятие поворотной точки t_i (рисунок 10). Разработан алгоритм работы СУ, реализация которого обеспечивает приведение катка в расчетное положение с заданной точностью.



Движение катка по уплотняемой поверхности при поворота моделировалось в программе MATLAB. При разработке программного кода и моделировании движения катка учитывались требования к точности выполнения работ дорожной техникой, оснащенной автоматизированной системой управления. Отклонения в плане, составили $\pm 0,05$ м, при этом погрешность приемника GPS - ГЛОНАСС навигации системы позиционирования принималась $\pm 0,025$ м.

С целью изучения влияния варьируемых конструктивных характеристик на корректность работы СУ роботизированной СДМ, параметры движения машины и способность СДМ выполнять поставленные задачи было исследовано влияние алгоритма работы СУ на интервал перестроения y_{un} траекторию движения машины. Установлена зависимость расстановки поворотных точек по времени и циклам срабатывания системы при перестроении на различные интервалы (рисунок 11).

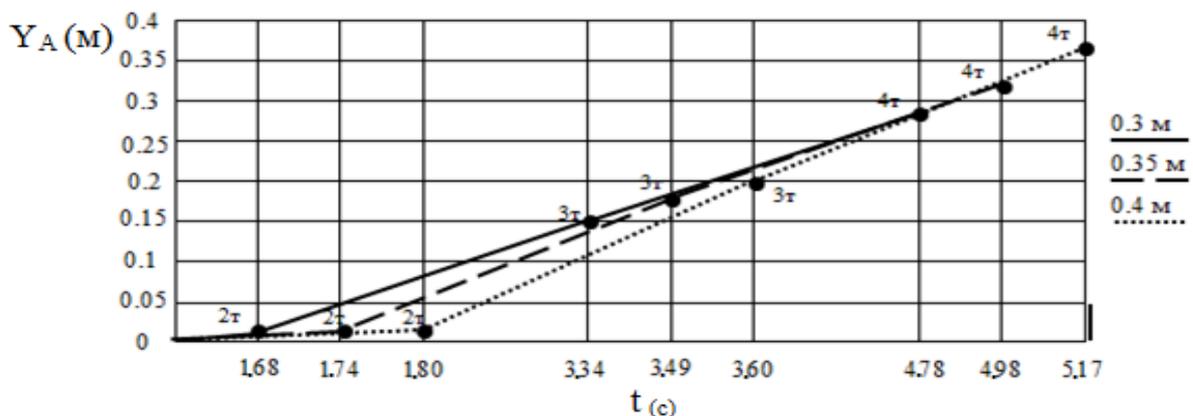


Рисунок 11 – Зависимость координаты Y_A от работы алгоритма системы управления (расстановка поворотных точек по времени и циклам срабатывания системы) при перестроении на 0,3, 0,35, 0,4 м

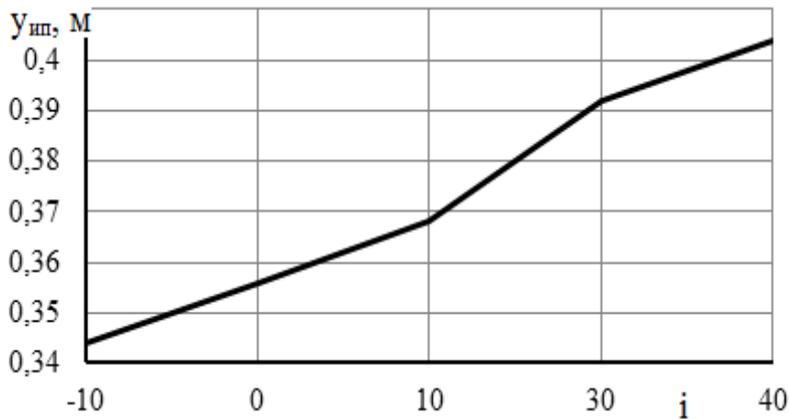


Рисунок12 – Зависимость y_{un} от Δi третьей поворотной точки. Перестроение на 0,35 м

На рисунке 12 представлена зависимость интервала перестроения в зависимости от смещения точки t_3 на количество циклов Δi . Как видно из представленной зависимости некорректная задача поворотной точки приводит к отклонению траектории катка от допустимой величины.

В ходе исследований моделировался процесс выполнения маневров перестроения на параллельный курс и разворот на параллельный обратный курс дорожным катком при выполнении технологических операций. Были отработаны режимы движения катка на различных скоростях, с различными скоростями поворота поворотного вальца; варьировались значения длины базы машины.

Исследования проводились для двух расчетных случаев:

- перестроение при движении с постоянной скоростью (расчетный случай 1);
- перестроение при разгоне с места до рабочей скорости (расчетный случай 2).

В ходе проведенных теоретических исследований были получены зависимости параметров траектории дорожного катка от конструктивных и эксплуатационных параметров машины: базы машины, скорости движения, скорости поворота поворотного вальца, алгоритма движения (рисунки 13 – 20).

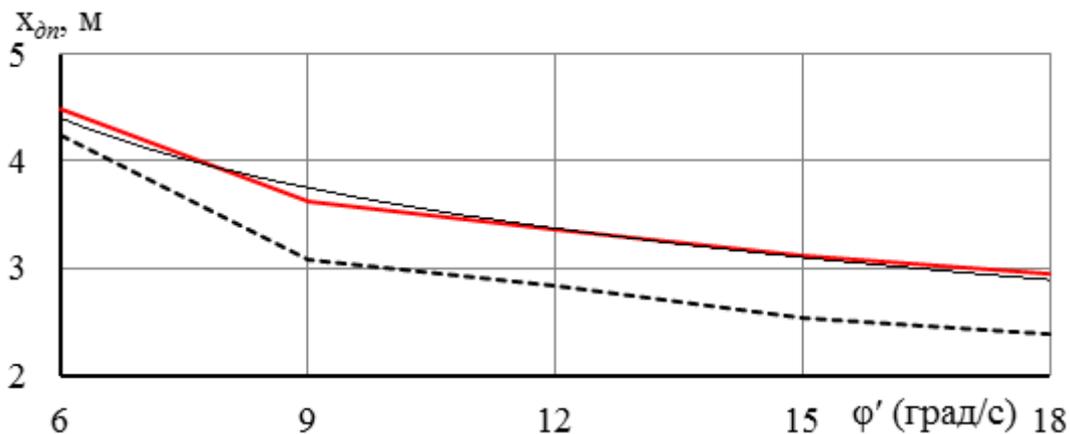


Рисунок 13 – Зависимость дистанции перестроения x_{0n} от угловой скорости поворота поворотного вальца ϕ' : расчетный случай 1 (сплошная); расчетный случай 2 (пунктирная)

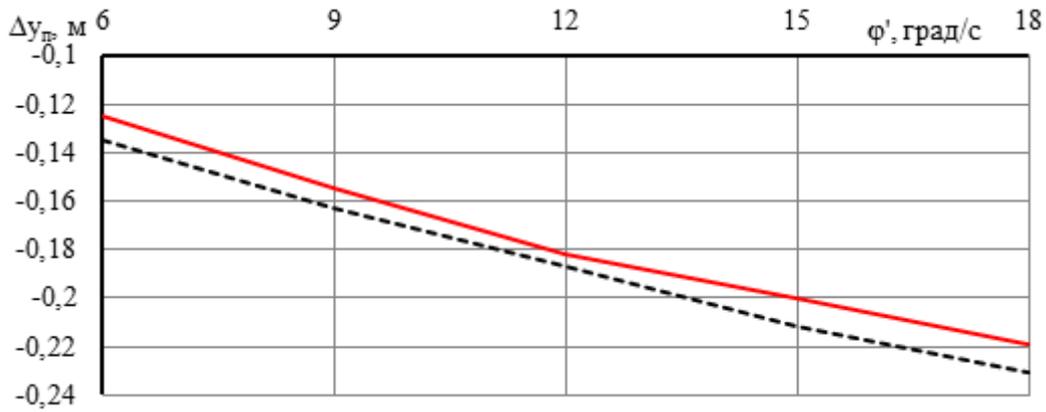


Рисунок 14 – Зависимость смещения поворотного вальца при перестроении Δy_n от его угловой скорости φ' : расчетный случай 1 (сплошная); расчетный случай 2 (пунктирная)

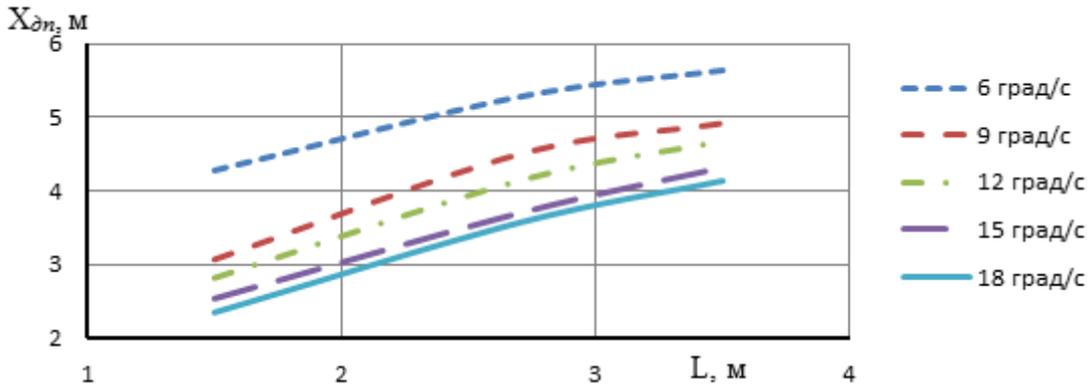


Рисунок 15 – Зависимость дистанции перестроения x_{0n} от базы катка L при скорости катка 2 км/ч

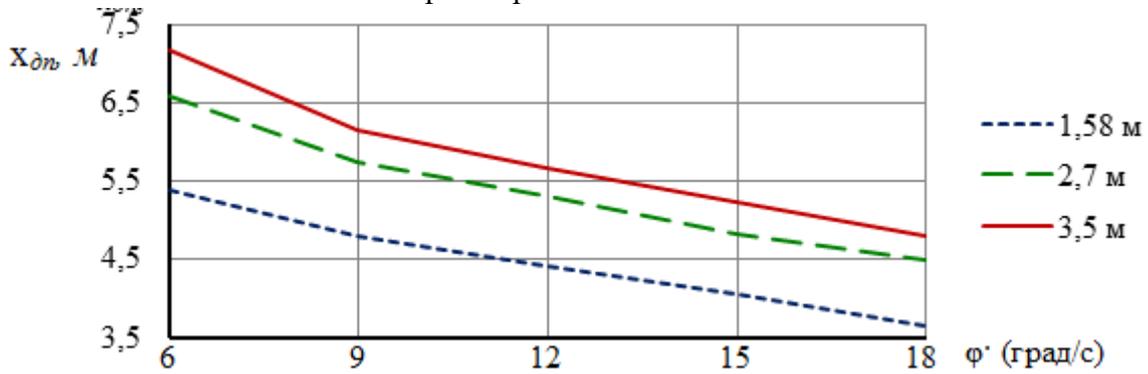


Рисунок 16 – Зависимость дистанции перестроения x_{0n} от скорости поворота вальца φ' при скорости катка 5 км/ч

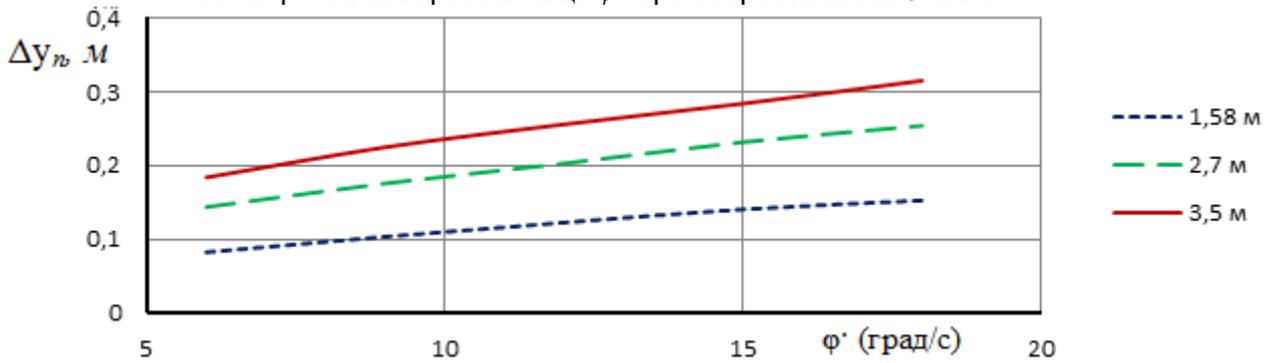


Рисунок 17 – Зависимость смещения поворотного вальца при перестроении Δy_n от скорости поворота вальца φ' при скорости катка 5 км/ч

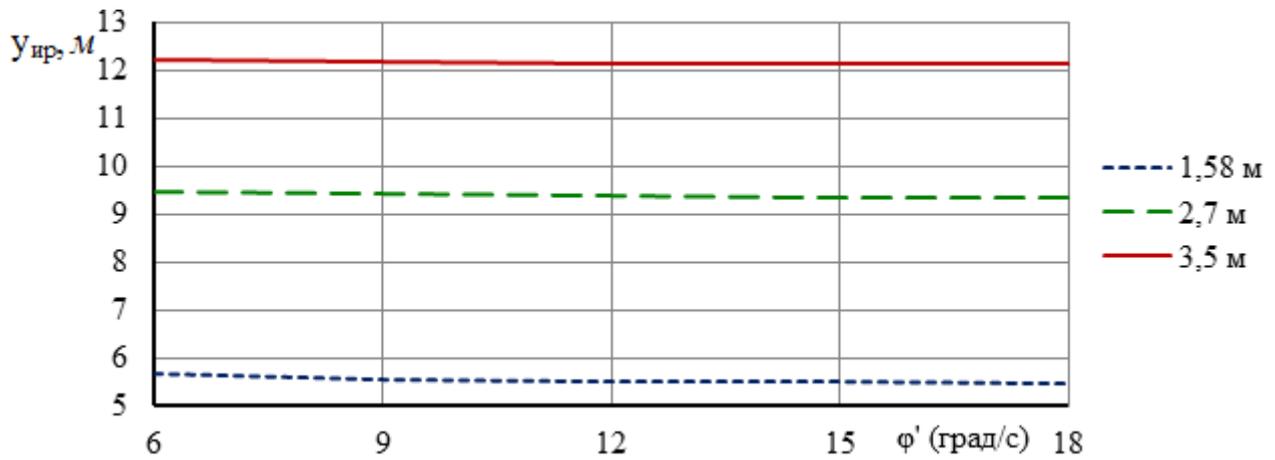


Рисунок 18 – Зависимость интервала разворота y_{up} от скорости поворот вальца φ' при скорости катка 2 км/ч

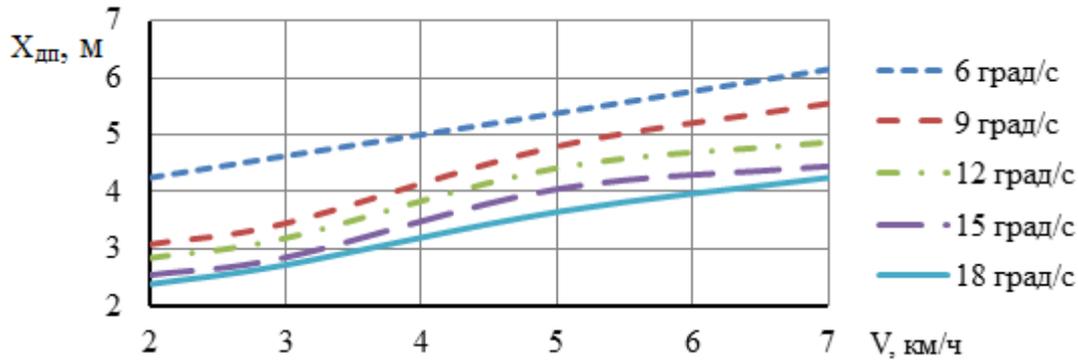


Рисунок 19 – Зависимость дистанции перестроения x_{dp} от скорости катка V , при длине базы 1,58 м

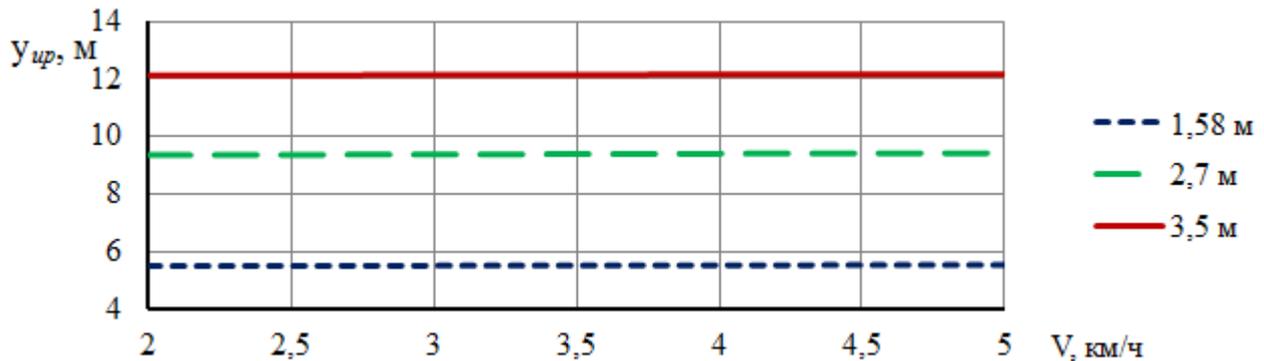


Рисунок 20 – Зависимость интервала разворота y_{up} от скорости катка при скорости поворота вальца $\varphi' = 18$ град/с

В результате проведенных исследований получены функциональные зависимости дистанции перестроения и смещения поворотного вальца при перестроении, дистанции и интервала разворота, величины смещения поворотного вальца при развороте. Полученные функциональные зависимости, с достаточно высокой точностью описанные уравнения регрессии, позволяют получать значения параметров, характеризующих траекторию движения катка при выполнении маневра перестроения и разворота для длины базы в диапазоне 1,5 – 3,5 м, скорости поворота поворотного вальца в диапазоне 6 – 18 град/с и скорости катка в диапазоне 2 – 7 км/ч.

$$x_{dp} = K_{dp1} L^2 + K_{dp2} L + K_{dp3}, \quad (12)$$

$$\Delta y_n = K_{yn1} L + K_{yn2}, \quad (13)$$

$$x_{dp} = K_{dp1} L + K_{dp2}, \quad (14)$$

$$y_{up} = K_{up1} L + K_{up2}, \quad (15)$$

$$\Delta x_p = K_{xp1} L + K_{xp2}, \quad (16)$$

где $K_{\partial ni}$, K_{yni} , $K_{up i}$, $K_{xp i}$ – коэффициенты, зависящие от угловой скорости поворота поворотного вальца, скорости машины, базы дорожного катка.

В пятой главе представлены основные результаты экспериментального исследования, произведена оценка адекватности математической модели сложной динамической системы «роботизированная система управления – строительная дорожная машина – рабочая среда», предложена методика выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров роботизированного дорожного катка.

Экспериментальные исследования катка ДУ-107 проводились на базе СибАДИ (рис. 21).

Цель исследований состояла в определении численных значений эксплуатационных параметров – скорости машины, скорости поворота поворотного вальца при выполнении маневра перестроения дорожного катка на параллельную полосу движения, на установленные дистанции и интервал.



Рисунок 21 – Движение катка ДУ – 107 по полигону

Анализ данных, полученных при экспериментальных исследованиях (рисунки 22 – 24), подтвердил характер изменения параметров траектории движения дорожного катка отмеченных при теоретических исследованиях.

Результаты численных значений параметров с достаточной степенью точности совпадают с результатами теоретических исследований. Величина относительной погрешности не превышает 18%. Характер траектории движения дорожного катка при теоретических и экспериментальных исследованиях совпадают. Таким образом, можно сделать вывод об адекватности математической модели.

Исследования, проведенные в работе, легли в основу инженерной методики выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров роботизированного дорожного катка на основании

критериев эффективности, предъявляемых нормативной и технологической документацией по уплотнению дорожных оснований и покрытий.

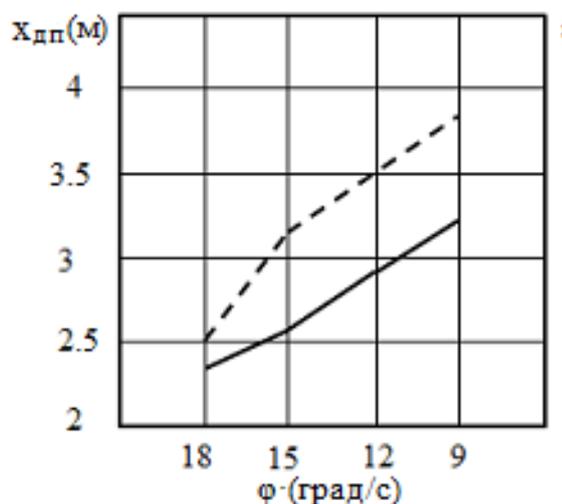


Рисунок 22 – Зависимость дистанции перестроения $x_{дп}$ от скорости поворота поворотного вальца (теоретическая – сплошная линия)

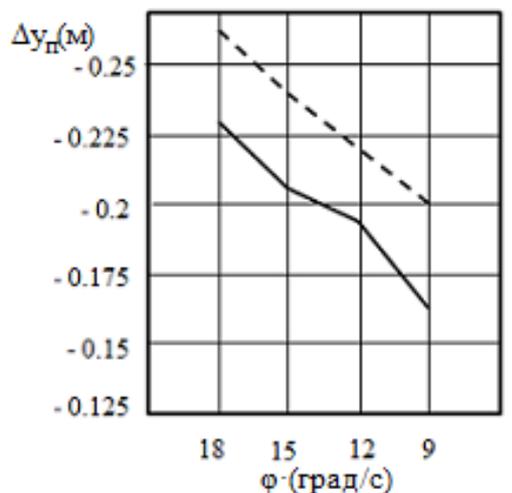


Рисунок 23 – Зависимость смещения поворотного вальца Δy_n от скорости поворота поворотного вальца (теоретическая – сплошная линия)

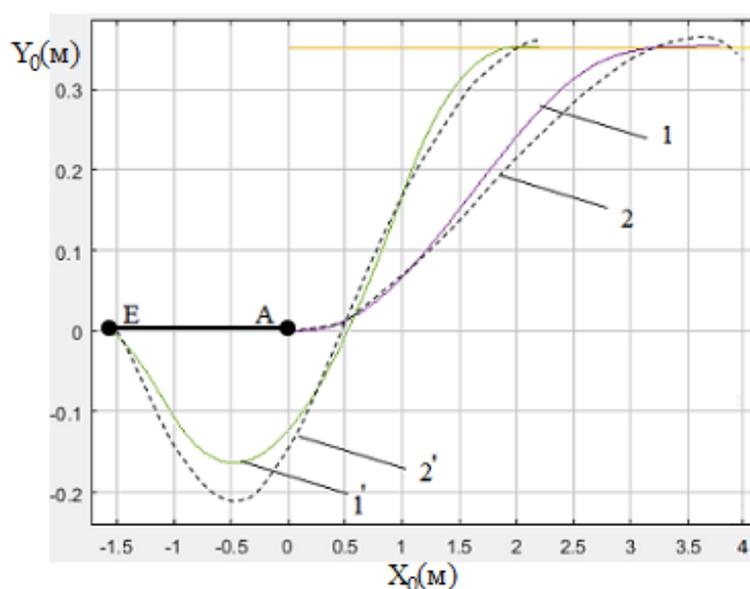


Рисунок 24 – Траектории движения катка ДУ-107:
1, 1' – траектории базовых точек катка А, Е (теоретические);
2, 2' – траектории базовых точек катка А, Е (экспериментальные)

Поэтапное выполнение предложенной методики (рисунок 25) позволяет определять основные конструктивные и эксплуатационные параметры и режимы при создании роботизированных дорожных катков и программировании их систем управления.

Заключение

Основные результаты и выводы по работе:

1. Обоснован критерий эффективности маневренности дорожного катка – дистанции перестроения (разворота) на параллельный курс.
2. Разработана математическая модель дорожного катка, представляющая собой совокупность моделей подсистем входящих в сложную динамическую систему «рабочая среда – дорожный каток – система управления», упорядоченно

взаимодействующих между собой таким образом, что выходные данные модели одной подсистемы являются входными для другой, позволяющая проводить моделирование работы системы управления, исследовать движение катка по уплотняемой поверхности.

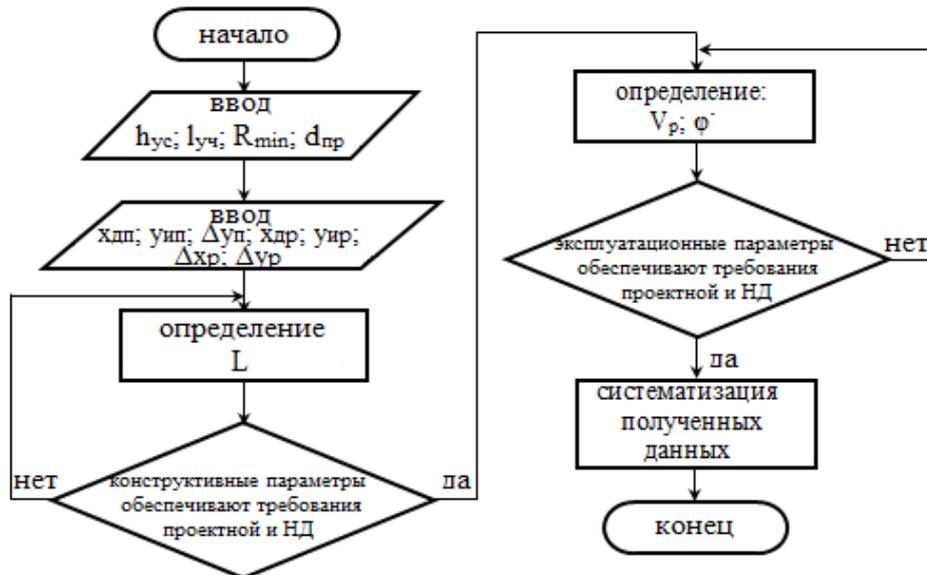


Рисунок 25 – Алгоритм выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров роботизированного дорожного катка

3. Получены функциональные зависимости дистанции перестроения и смещения поворотного вальца при перестроении, дистанции и интервала разворота, величины смещения поворотного вальца при развороте, которые позволяют провести на этапе проектирования дорожного катка предварительную оценку маневренных характеристик катка на соответствие требований технического задания на разработку дорожного катка.

Полученные функциональные зависимости с достаточно высокой точностью (не менее $R^2 = 0,9068$) получают значения параметров характеризующих траекторию движения катка при выполнении маневра перестроения и разворота для длины базы в диапазоне 1,5 – 3,5 м, скорости поворота поворотного вальца в диапазоне 6 – 18 град/с и скорости катка в диапазоне 2 – 5 км/ч.

4. Разработан алгоритм работы системы управления дорожного катка обеспечивающий движение катка по заданной траектории с требуемой точностью. Данный алгоритм может быть использован при создании системы управления роботизированного дорожного катка предприятиями, занимающимися проектированием и производством дорожной-строительной техники.

Разработана методика выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров, обеспечивающих необходимые параметры траектории движения катка: дистанцию перестроения и смещения поворотного вальца при перестроении, дистанции и интервала разворота, величины смещения поворотного вальца при развороте.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на создание систем управления движением комплексом строительно-дорожных машин осуществляющих взаимосвязанные работы на строительной площадке.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:**В изданиях рекомендованных ВАК:**

1. Артеменко, М.Н. Тенденции развития мобильных беспилотных роботизированных комплексов. Опыт отечественных и зарубежных производителей / М.Н. Артеменко, П.А. Корчагин, И.А. Тетерина // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2019. – Т.16. - №4 (68). – С. 416-430.
2. Артеменко, М.Н. Результаты теоретических исследований математической модели поворота дорожного катка / М.Н. Артеменко, П.А. Корчагин, И.А. Тетерина // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т.19, №3 (85). – С. 320-329.
3. Артеменко, М.Н. Математическая модель дорожного трехосного катка / М.Н. Артеменко, П.А. Корчагин, И.А. Тетерина // Строительные и дорожные машины. – 2022. – №8 (68). – С. 14-17.

В других изданиях:

1. Артеменко, М.Н. Системы управления роботизированных строительно-дорожных машин / И.А. Тетерина, М.Н. Артеменко // Сборник материалов II Международной научно-практической конференции. Омск, 2017. – С. 61-64.
2. Артеменко, М.Н. К вопросу о выборе системы управления роботизированным комплексом на базе строительно-дорожной машины/ М.Н. Артеменко, П.А. Корчагин, И.А. Тетерина // Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. – Омск, 2019. – С. 67-70.
3. Артеменко, М.Н. Результаты экспериментальных исследований влияния эксплуатационных параметров на траекторию движения базового дорожного катка / М.Н. Артеменко, П.А. Корчагин, И.А. Тетерина // Сборник материалов V Национальной научно-практической конференции. – Омск, 2022. – С. 67-70.
4. Артеменко, М.Н. Совершенствование роботизированных дорожных строительных машин / М.Н. Артеменко // Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Омск, 2022. – С. 44-49.
5. Артеменко, М.Н. Совершенствование системы управления роботизированного дорожного катка / М.Н. Артеменко, П.А. Корчагин, И.А. Тетерина // Сборник ИНТЕРСТРОЙМЕХ – 2022: материалы XXVI Международной научно-технической конференции. – Ярославль, 2022. – С. 218-227.