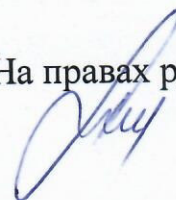


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный
университет (СибАДИ)»

На правах рукописи



Артеменко Максим Николаевич

**Повышение маневренности роботизированного
дорожного катка**

Специальность 2.5.11 – «Наземные транспортно-технологические средства и
комплексы»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:
доктор технических наук,
профессор П.А. Корчагин

Омск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ...	11
1.1 Анализ работ выполняемых строительными и дорожными машинами при строительстве автомобильных дорог.....	11
1.2 Анализ нормативно-технической документации и правил производства работ СДМ. Определение критерия эффективности	15
1.3 Анализ существующих роботизированных систем управления курсом дорожных машин.....	19
1.4 Анализ элементов роботизированных систем управления мобильных дорожных машин	29
1.5 Обзор предшествующих работ в области моделирования роботизированных СДМ.....	45
1.6. Выводы по главе. Цели и задачи исследования	51
2. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ	53
2.1 Общая методика исследования	53
2.2 Методика теоретических исследований	55
2.3 Методика экспериментальных исследований	57
3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛОЖНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «РАБОЧАЯ СРЕДА – ДОРОЖНЫЙ КАТОК – СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ»	62
3.1 Математическая модель дорожного катка	62
3.2 Математическая модель поворота дорожного катка	66
3.3 Модель системы управления дорожного катка	70
3.4 Математическая модель рабочей среды	76
Выводы по главе	78

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	80
4.1. Обоснование параметров характеризующих маневренность дорожного катка	80
4.2. Алгоритм работы системы управления при выполнении маневра	86
4.3 Исследования влияния конструктивных и эксплуатационных параметров на значения параметров характеризующих маневренность дорожного катка	94
Выводы по главе	109
5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	111
5.1 Экспериментальные исследования дорожного катка	111
5.2 Методика выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров дорожного катка, обеспечивающих требуемые параметры траектории движения катка	124
Выводы по главе	127
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	129
Список сокращений	131
Список условных обозначений	132
Список литературы	133
Приложения	146

ВВЕДЕНИЕ

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 [30].

Программа «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года», принятая правительством РФ, Указ президента РФ № 474 от 21.07.2020 «О национальных целях развития РФ на период до 2030 года», Распоряжение правительства РФ № 1601 – Р от 20.06.2022 г. «Перечень мероприятий по осуществлению дорожной деятельности в 2023 – 2027 годах в отношении автомобильных дорог» и другие, предполагает увеличение сети автомобильных дорог минимум в 1,5 раза.

Одновременно с этим, «Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации», утвержденная Указом Президента РФ от 1.12.2016 года № 642, указывает в качестве приоритетов и перспектив научно-технологического развития РФ переход к передовым цифровым, интеллектуальным технологиям, роботизированным системам. А как результат реализации данной стратегии, в том числе, технологическое обновление традиционных для России отраслей экономики.

Так же, в качестве приоритета развития науки, технологий и техники, выделено создание робототехнических комплексов (систем) военного, специального и двойного назначения. Что отражено в Указах Президента РФ № 899 от 07.07.2011, № 623 от 16.12.2015 г.г..

Являясь подотраслью капитального строительства, дорожное строительство по своим масштабам и объему производимых работ, производимой продукции (автомобильные дороги, мосты, путепроводы), на сегодняшний день вполне может конкурировать с некоторыми отдельными отраслями.

Кроме того, экономико-географические особенности Российской Федерации их социально-экономические аспекты, делают дорожное строительство одним из самых значимых элементов народного хозяйства.

Одной из составляющих модернизации, наряду с введением новых технологий выступает роботизация производства. Её экономическую эффективность подтверждает опыт ведущих промышленно развитых стран, таких как Япония, Германия, США, Великобритания, Южная Корея и др. Значительную роль, в развитии промышленности которых, играет массовая роботизация [8, 64].

Стоит отметить успехи российских и белорусских разработчиков роботизированных транспортных систем, машин.

Так, в 2016 году, в рамках Московского международного автосалона, ПАО «КАМАЗ» презентовал эксклюзивную концепцию городской транспортной системы, основой которой явились беспилотные автобусы. Там же был представлен прототип автобуса - робота, который сейчас успешно проходит испытания [37].

Успешными же можно назвать и работы концерна «БЕЛАЗ» по созданию роботизированного, беспилотного карьерного самосвала [7].

Одним из направлений роботизации дорожного строительства является создание роботизированных строительно-дорожных машин (СДМ) [108].

Основными критериями целесообразности их создания будут:

- увеличение производительности;
- повышение качества работ;
- снижение эксплуатационных расходов.

В настоящее время, в дорожном строительстве, ключевым и неотъемлемым элементом производственного процесса является человек. Использование СДМ предполагает привлечение большого количества операторов, водителей. Причем, для обеспечения непрерывного производственного процесса, количество специалистов, привлекаемых для управления данной техникой и работе на ней, должно превышать (зачастую в несколько раз) количество самой техники. Это

обусловлено тем, что эффективность работы водителей, операторов напрямую зависит от соблюдения норм режима труда и отдыха [98].

Кроме того, физиологические особенности человеческого организма приводят к снижению работоспособности с течением времени, что отрицательно сказывается на производительности и качестве работ.

Робот призван исключить эти и многие другие факторы, связанные с использованием человеческого труда [29].

Уплотнение полотна, дорожных покрытий и др. является неотъемлемой частью и одним из основных элементов дорожного строительства. А дорожные катки одними из наиболее распространенных образцов СДМ. В связи с этим роботизация дорожных катков является актуальной и перспективной задачей. И в полной мере соответствует программам «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года», «Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации» и др.

Степень разработанности темы. Наибольшая часть исследований и работ в области создания мобильных роботов, машин, в том числе и СДМ отечественными учеными проводилась в ФГБУН институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, Институт прикладной математики им. В.М. Келдыша, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАДИ, МАИ, ЮФУ, АлтГТУ, ТПУ, СибАДИ, БрГУ и др. Здесь можно назвать имена таких ученых, как А.Л. Кемурджиан, Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов, Ю.Ф. Голубев, Ф.Л. Черноушко, Н.Н. Болотник, В.Г. Градецкий, В.Е. Павловский, В.И. Баловнев, Артемьев К.А., Анохин И.А., Алексеева Т.В., и др. Из иностранных ученых можно выделить James Adams, John McCarthy, Ernst Dickmanns и т.д.

Этими учеными проделана большая работа по созданию теоретических основ разработки мобильных роботов. Заложенные научные положения определяют и направляют дальнейшее развитие теоретических исследований в области роботизации мобильных транспортных средств, СДМ.

Целью 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.

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.

Рабочая гипотеза состоит в том, что повышение качества работ по уплотнению конструктивных слоев существенно зависит от конструктивных и эксплуатационных параметров, параметров системы управления роботизированного дорожного катка и точности его движения по уплотняемой поверхности.

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 сложной 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, дистанции и интервала 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 исследования докладывались и обсуждались на II Международной научно-практической конференции. Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации Омск, 15–16 ноября 2017 года; III Международной научно-практической конференции. Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации Омск, 29–30 ноября 2018 года; V Национальной научно-практической конференции. Омск, 2022 Образование. Транспорт. Инновации. Строительство, Омск, 28 апреля – 29 июня 2022 года; Международной научно-технической конференции «ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2022» (INTERSTROIMECH 2022), Ярославль, 12-14 октября 2022 г.

Результаты проведенных научных исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «СибАДИ». Разработанная методика выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров, обеспечивающих необходимые

параметры траектории движения катка, внедрена к использованию ООО «Завод дорожных машин» г. Рыбинск Ярославская область.

Соответствие паспорту научной специальности.

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, в том числе в их узлах, механизмах, системах и технологическом оборудовании при взаимодействии с опорной поверхностью и с рабочими средами (объектами)», п.6 «Оптимизация конструкций и синтез законов управления движением наземных транспортно-технологических средств и их комплексов, а также их отдельных функциональных узлов, механизмов и систем, направленные на улучшение экономичности, надежности, производительности, экологичности и эргономичности, технологической производительности, обеспечение энергоэффективности и безопасности».

Реализация результатов работы.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 8 печатных работ, в том числе 5 статей в сборниках материалов научных конференций, 3 статей 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 таблиц и 3 приложений. Список литературы содержит 122 источника.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ работ выполняемых строительными и дорожными машинами при строительстве автомобильных дорог

Строительные дорожные машины (СДМ), привлекаемые для строительства автомобильных дорог, по видам выполняемых работ можно разделить на две группы [14]:

- машины транспортной группы;
- строительные машины (технологические).

Машины транспортной группы выполняют работы по доставке (транспортировке) материалов, полуфабрикатов, оборудования от пунктов заготовки, производства на строительные площадки, то есть к местам непосредственного применения, использования, а также обеспечения технологии строительства, производства [26, 66, 78].

В свою очередь эта группа делится на:

- машины, участвующие в технологическом процессе строительства и применяемые в пределах строительной площадки;
- машины, обеспечивающие работу производственных предприятий (ЗЖБИ, АБЗ и т.д.);
- машины, осуществляющие транспортировку грузов от мест заготовки и производства к местам применения [66, 78].

Работы, выполняемые машинами транспортной группы, отличаются, зачастую в высокой степени, не определенными, не четкими условиями проведения. Это и непрерывно меняющиеся дальность и маршруты перевозок, использование автомобильных дорог общего назначения, высокая зависимость от человеческого фактора и многое другое. Все это на сегодняшний день затрудняет процесс роботизации машин транспортной группы.

Машины строительной (технологической) группы применяются непосредственно для строительства автомобильных дорог. Выполняют

подготовительные работы, работы по строительству земляного полотна, дорожных оснований, обустройству асфальтобетонных, цементобетонных покрытий.

На рисунке 1.1 приведена схема распределения строительных машин по видам работ [66].



Рисунок 1.1 - Схема распределения дорожно-строительных машин по видам работ

В отличие от машин транспортной группы, работы, выполняемые строительными машинами, локализованы на строительной площадке. Исход процесса работ полностью определяется алгоритмом их проведения, условиями, входными данными на начало выполнения операции, практически исключены факторы, способные повлиять на конечный результат.

Все это обеспечивается за счет проведения качественных подготовительных работ (геодезических, разбивочных и др.), строгого соблюдения и выполнения

требований технологической, нормативно-технической, проектной документации и т.д.

Кроме того, 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. Действие строительной машины осуществляется 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 [66, 19].

На рисунке 1.2 представлена схема движения дорожного катка при выполнении операций по уплотнению дорожных оснований и покрытий.

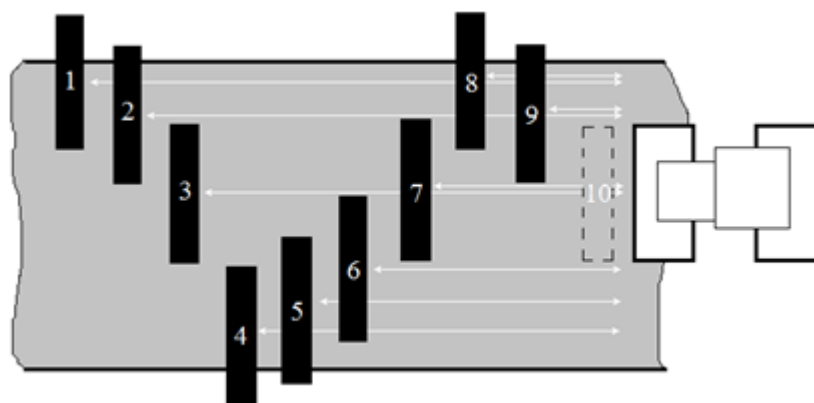


Рисунок 1.2 - Схема движения катка при выполнении работ по уплотнению асфальтобетонной смеси [66]:

показана челночная схема движения с неоднократным проходом по одному маршруту, где цифры обозначают последовательность прохода

К наиболее часто встречающимся схемам движений можно отнести (рисунок 1.3): челночную, продольно-поворотную, спиральную, продольно-кольцевую, возвратно-поступательную, продольно-поперечную ортодоксальную, продольно-поперечную угловую, зигзаг, эллипс, восьмерку и другие. Для каждого

вида и типа машин схемы движений определяются видом выполняемых работ, технологией, условиями применения и другими факторами.

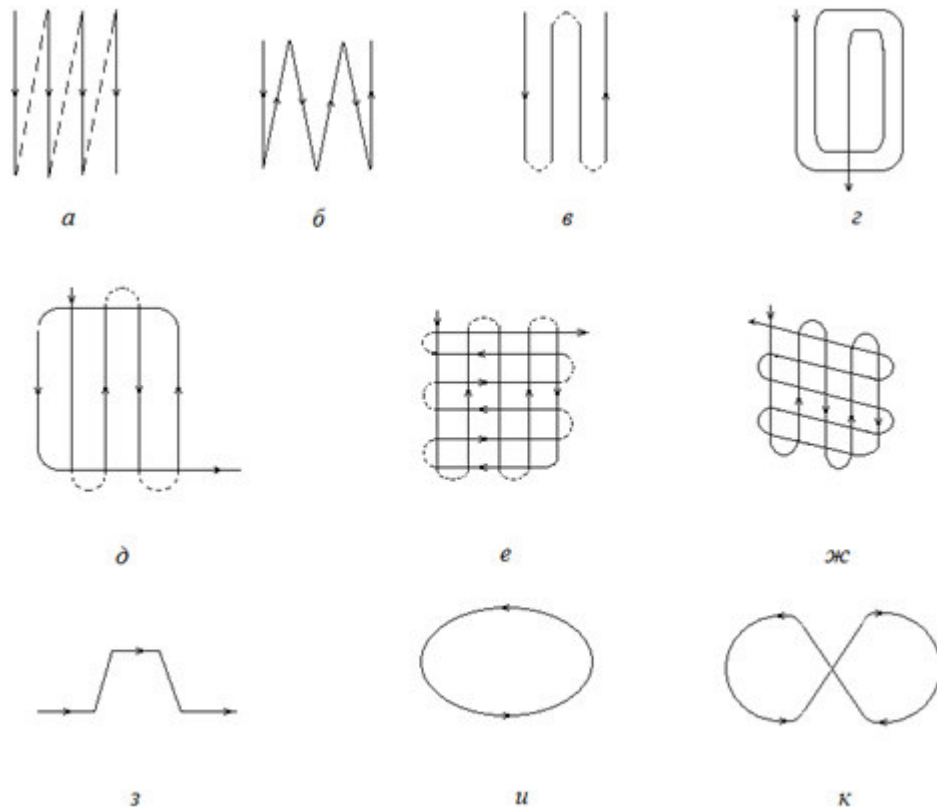


Рисунок 1.3 - Общие схемы движения СДМ при производстве строительных дорожных работ [66]:

а – челночная; *б* – возвратно-поступательная; *в* – продольно-поворотная; *г* – спираль; *д* – продольно-кольцевая; *е* – продольно-поперечная ортогональная; *ж* – продольно-поперечная угловая; *з* – зигзаг; *и* – эллипс; *к* – «восьмерка» и др.

Проведенное исследование, на основе анализа условий использования данного вида техники, технологических особенности операций выполняемых СДМ, позволяет сделать вывод о целесообразности роботизации процессов дорожного строительства способом включения в устройство СДМ роботизированной системы управления.

1.2 Анализ нормативно-технической документации и правил производства работ СДМ. Определение критерия эффективности

Правила и параметры производства и оценки качества работ в дорожном строительстве регламентируются законодательством Российской Федерации и установлены в нормативных документах, ГОСТ, ОСТ, СНИП, СП и др.

Строительные дорожные машины, применяемые в дорожном строительстве, должны обладать параметрами и характеристиками обеспечивающими качество выполнения работ, в соответствии с установленными требованиями [5, 9].

Определение и нормирование правил, параметров и требований, установленных НД, есть процесс установления критериев, на основании которых и принимается решение по оценке эффективности использования машины.

При определении критериев эффективности необходимо учитывать основные требования, предъявляемые к ним. Это [6, 24]:

- информативность;
- соответствие критерия основной целевой задаче системы;
- наличия понятного физического смысла и общепринятых физических единиц измерения;
- наличие характеристик и параметров объекта, значения которых необходимо установить или оптимизировать;
- определение критерия с учетом условий и ограничений эксплуатации и др.

Основные нормы, правила и требования, устанавливаемые нормативной документацией, непосредственно или косвенно касающиеся используемых в дорожном строительстве СДМ, можно разделить на требования, относящиеся к качеству выполняемых работ и требования устанавливающие параметры дорожного полотна.

Для дорожных катков параметры для оценки качества разделяют на:

- параметры, касающиеся качества уплотнения слоя;
- параметры, касающиеся точности значений характеристик уплотняемого полотна на основании проектных значений.

В настоящее время к основным нормативным документам, регламентирующим дорожное строительство в данной части, можно отнести СП 78.13330.2012 (СНиП 3.06.03 – 85) [85].

Качество уплотнения дорожных оснований и покрытий достигается за счет необходимой нагрузки и достаточного количества проходов, т.е. движения дорожного катка по определенной траектории заданное количество раз, с заданной скоростью.

К точности значений характеристик уплотняемого полотна на основании проектных значений нормативными документами предъявляются требования по пооперационному контролю по устройству дорожной одежды. Контролю подлежит, в том числе, ширина уплотняемого слоя каждые 100 метров, поперечный профиль (расстояние между осью полотна и бровкой), радиусы кривизны профиля, требование обеспечения и удержания минимального расстояния между асфальтоукладчиком и катком, и т.д.

В таблице 1.1 представлены параметры для оценки качества строительно-монтажных работ по контролю ширины уплотняемого слоя.

Таблица 1.1 Параметры для оценки качества строительно-монтажных работ

Конструктивный элемент, вид работ и контролируемый параметр	Значения нормативных требований
Ширина слоя	
Основания и покрытия асфальтобетонные, цементобетонные	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений от – 7,5 см до + 10 см, остальные ± 5 см
Все остальные типы оснований и покрытий	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до + 10 см, остальные от - 5 см до + 10 см

Соблюдение требований нормативной документации должно достигаться движением дорожного катка по заданной траектории с отклонениями не превышающим установленные допуски.

Решение этих задач невозможно без моделирования процесса движения катка, понимания и знания законов построения траектории движения дорожной строительной машины, т.е. зависимостей параметров траектории движения машины от эксплуатационных и конструктивных параметров дорожного катка.

Производительность дорожного катка определяется как объем уплотняемого материала в час. Традиционно повышение эффективности (производительности) катков исследователи старались достичь за счет совершенствования процесса уплотнения материала и за счет этого сокращения числа проходов по одному следу, увеличения рабочей скорости. Однако производительность зависит также и от ширины уплотняемой полосы за один проход, ширины перекрытия следа, длины прохода, толщины уплотняемого слоя (в плотном теле), затраты времени на переход к соседнему слою. Длина прохода определяется проектной документацией, толщина слоя, рабочая скорость и количество проходов по одному следу зависят типа уплотняемого материала, выбранного типа машины и определяются расчетным путем, а затем уточняются в ходе тестового уплотнения. Повышение производительности может быть достигнуто за счет уменьшения затрат времени на переход к соседнему слою, уменьшения ширины перекрытия (не ниже требуемой) за счет повышения точности позиционирования.

Кроме производительности критерием эффективности процесса уплотнения служит коэффициент уплотнения. Коэффициент уплотнения характеризует изменение плотности материала и зависит от гранулометрического состава, пористости частиц, влажности и интенсивности механического воздействия. При уплотнении дорожными катками требуемый коэффициент уплотнения зависит от количества проходов по одному следу (в зависимости от выбранного типа катка).

Основным отличием роботизированных дорожных катков от существующих катков является отсутствие оператора. Функции управления дорожным катком возложены на систему управления (СУ). Выполнение работ заданного качества обеспечивается чувствительностью системы управления, в том числе подсистемой позиционирования, а так же расчетом, построением, корректировкой

в движении системой управления траектории роботизированного дорожного катка, при выполнении технологических операций по уплотнению дорожных оснований и покрытий, заданной скорости движения. При этом технические возможности современных приемников GPS/ГЛОНАСС с использованием базовых станций RTK позволяют осуществлять позиционирование машины с требуемой точностью.

Для роботизированных дорожных катков, выполнение работ заданного качества, при отсутствии оператора, невозможно без корректной работы системы управления, т.к. основной задачей СУ является обеспечение требуемой маневренности машины, т.е. управлением движением катка по заданной траектории с заданной скоростью, обеспечивая требуемую точность.

Исходя из этого, повышение производительности и качества работ, выполняемых дорожным катком, может быть достигнуто за счет планирования требуемой траектории движения, минимизации:

- дистанции перестроения на параллельный курс $x_{дп}$ (м);
- дистанции разворота $x_{др}$ (м);

и обеспечения позиционирования катка с установленной СП 78.13330.2012 точностью:

- интервала перестроения на параллельный курс $y_{ип}$ (м);
- интервала при развороте $y_{ир}$ (м).

Таким образом, критерий эффективности, характеризующий маневренность роботизированного дорожного катка может быть представлен в виде критерия:

$$x_{дп} \rightarrow \min;$$

при условии $y_{ип} = y_{тр} \pm \Delta$.

где $y_{тр}$ – расчетное (требуемое) значение интервала перестроения (разворота);

Δ – величина погрешности в соответствии с СП 78.13330.2012.

1.3 Анализ существующих роботизированных систем управления курсом дорожных машин

Роботизированные системы управления (СУ) являются составной и неотъемлемой частью мобильных робототехнических комплексов, роботизированных дорожных машин. Под СУ принято понимать набор функций логического управления и силовых функций, позволяющих проводить мониторинг, управление механической конструкцией робота, и осуществлять связь с окружающей средой, оборудованием, оператором [21]. А так же совокупность технических элементов обеспечивающих реализацию управления.

При создании роботизированных систем разработчики в первую очередь руководствуются требованиями, предъявляемыми к каждой конкретной системе. Облик этой системы, ее состав, принцип работы напрямую зависит от задач, которые должна выполнять система, от условий ее применения и множества других факторов [92].

На рисунке 1.4 представлена классификация систем управления робототехническими комплексами (РТК).

В настоящее время, среди множества систем управления мобильными роботами, можно выделить несколько характерных видов таких систем:

- адаптивные системы управления;
- интеллектуальные системы управления;
- системы кооперативного управления;
- системы автопилотирования;
- системы управления курсом по обозначенному маршруту;
- системы дистанционного управления;
- комбинированные системы управления;

Адаптивные системы управления – это СУ способные автоматически перепрограммироваться (адаптироваться) в зависимости от обстановки. Программа действий, задаваемая роботу изначально, является лишь основой [25, 63, 118]. То есть особенностью данных систем является их способность

самостоятельно решать вводные задачи, возникающие при выполнении основной целевой задачи.

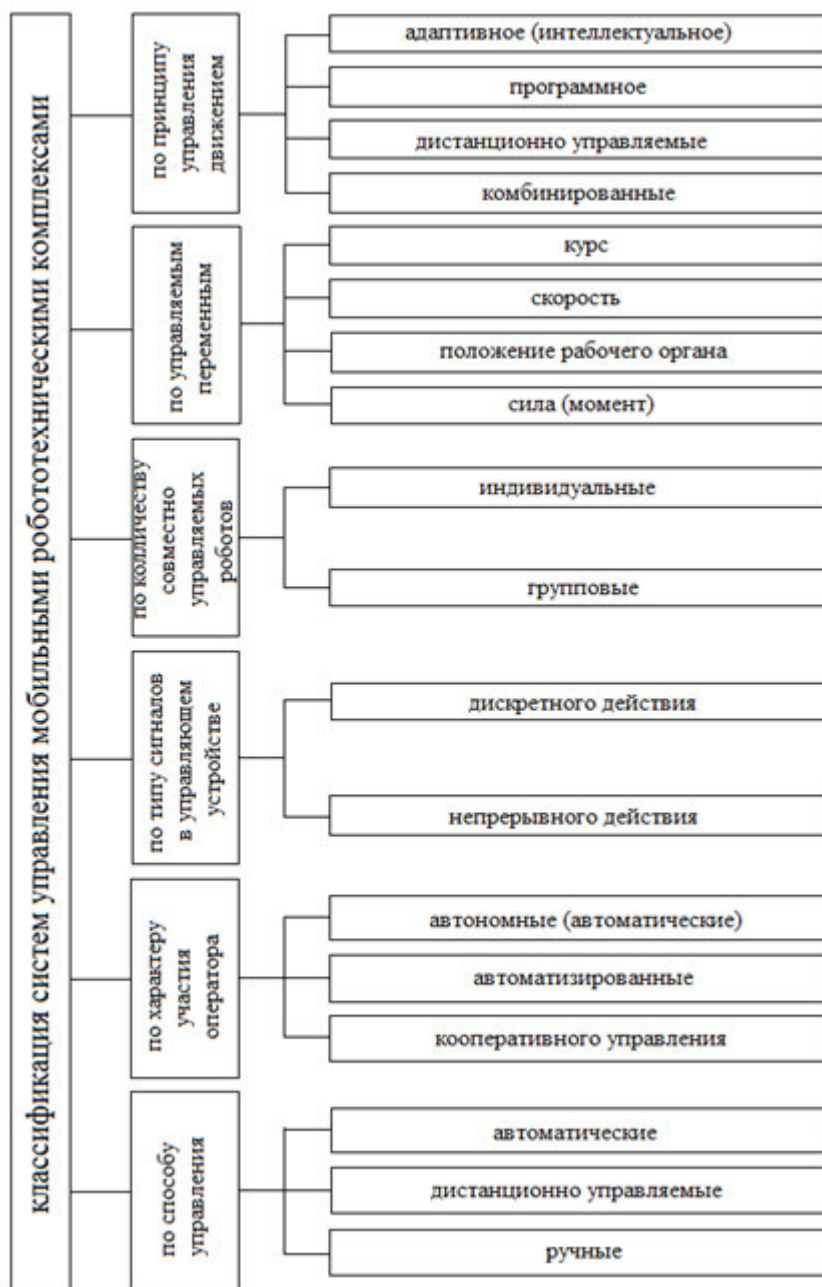


Рисунок 1.4 - Классификация систем управления мобильным РТК [42]

Как пример можно привести способность системы управления курсом мобильного РТК самостоятельно объезжать препятствия, возникающие на пути движения по указанному маршруту. Это позволяет роботу действовать автономно от оператора, расширяет области применения РТК.

Для реализации данного способа управления возникает необходимость оперативного получения и анализа данных окружающей обстановки, состояния РТК. Наличие в составе СУ информационных, сенсорных систем, является обязательным условием его осуществления [107, 113, 122].

Основными составными частями адаптивной системы управления будут являться:

- система навигации;
- система автоматического управления;
- система технического зрения (СТЗ), комплекс информационных датчиков [40, 41, 86].

Интеллектуальные системы управления возникли в результате эволюции, усложнения адаптивных систем. Особенностью этих систем является наличие и применение искусственного интеллекта, то есть способности приобретать и целенаправленно использовать знания, решать не формализуемые, творческие задачи [27, 62, 107].

Эти задачи не предполагают полноты знаний. Система должна сама уметь упорядочить получаемую информацию и знания, и выделить необходимые, существенные данные. Интеллектуальная система должна иметь способность к самообучению на основе полученного опыта, способность к адаптации и т.д. [25, 115].

Создание интеллектуальных систем в настоящее время сталкивается с определенными трудностями. Требуется принципиально новое аппаратное обеспечение на принципиально новой элементной базе. Пока же есть возможность создавать только адаптивные системы управления с некоторыми элементами искусственного интеллекта. Они способны исследовать внешнюю среду, проводить анализ данных, принимать решения. Однако имеют очень ограниченные интеллектуальные возможности. На сегодняшний день единственными полноценными интеллектуальными системами можно назвать, так называемые, биотехнические системы, в которых творческая часть остается за человеком, а «четкая» логика обязанность компьютера [107, 114].

Система кооперативного управления (СКУ) – сложная адаптивная (интеллектуальная) система, включающая в свой состав СТЗ, комплекс информационных датчиков, способных сформировать комплексное представление о текущей ситуации.

База знаний, заложенная в систему управления, делает РТК с СКУ способным к автономному поведению, то есть позволяет самостоятельно ориентироваться и принимать решения.

Однако когда задача, стоящая перед роботом, четко не определена (робот — разведчик), когда условия выполнения создают большую вероятность ошибки, а цена этой ошибки высока, возникает необходимость взаимодействия системы управления с оператором. На это и способна система кооперативного управления. Но в данном случае взаимодействие, это не непосредственное управление роботом, а постановка задач, диалог между системой и человеком [119].

Например, при постановке задачи на движение по указанному курсу, система самостоятельно производит планирование операции, разрабатывает траекторию движения, принимает решение на начало движения. При возникновении непредвиденных препятствий, появляется необходимость перепланирования операции, уточнения задачи. Здесь и необходим диалог оператора с роботом.

Оператор уточняет задачу, например «объехать препятствие справа». Система перепланирует маршрут, принимает решение, продолжает движение по указанной траектории. Реализация такого взаимодействия (диалога) оператора с системой управления достигается разработкой и включением в СКУ интерфейса для коммуникации человека и машины [58].

Основными преимуществами рассмотренных адаптивных, интеллектуальных систем является автономность. Это свойство делает машины, снабженные такой системой управления, очень востребованными в различных отраслях, от ликвидации последствий техногенных катастроф, до пассажирских и грузовых перевозок автомобильным транспортом.

К **системам автопилотирования** (СА) относятся системы управления способные самостоятельно, без участия оператора, вести мобильный РТК по указанному маршруту с заданной скоростью. Эти системы не относятся к интеллектуальным или адаптивным. Их программное обеспечение и состав позволяют только поддерживать заложенный в программу управления курс и скорость.

СА включают в свой состав систему навигации, с помощью которой будет осуществляться точное позиционирование РТК, интегрируемое в систему управления машиной оборудование, датчики, позволяющие отслеживать углы поворота управляющих колес, руля и другие параметры необходимые для реализации автопилотирования. Так же специальные устройства обеспечивающие работу системы, передачу управляющих воздействий к исполнительным механизмам и т.д. (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 - Структурная схема системы автопилотирования [70]

Рассмотрим работу системы.

При движении мобильного РТК по заданной траектории, происходит прием сигналов со спутников GPS / ГЛОНАСС – приемником и определение текущих координат и скорости. Полученные данные передаются для обработки управляющей программой в управляющий компьютер (УК).

Одновременно в УК, через АЦП, с датчиков угла поворота и положения органов управления передается напряжение измерительной схемы.

Используя полученные данные, управляющая программа рассчитывает закон управления курсом и скоростью обеспечивающий движение по заданной траектории с заданной скоростью.

Через ЦАП передается управляющий сигнал управления привода рулевого механизма и органов управления скоростью, чем обеспечивается поворот управляемого вальца (колес) на необходимый угол, увеличение (уменьшение) скорости [70].

Системы автопилотирования просты в исполнении и как следствие более надежны, дешевы в производстве и эксплуатации. Эти же качества делают их перспективными и для СДМ.

СА уже достаточно давно используются в сельском хозяйстве. Мобильные роботы, разработанные компаниями Amazonen Werke, Robert Bosch GmbH, Toshiba и др. неплохо зарекомендовали себя на мировом рынке [109].

На российском рынке компании Trimble, Agrom, John Deere, Claas и другие представляют широкую линейку систем точного земледелия, представляющую собой систему автопилотирования для сельскохозяйственной техники. Данные системы имеют различное исполнение. Они могут быть полностью автономными (система Auto Trac Universal 200 с системой интеллектуального комплексного управления оборудованием iТес Pro компании John Deere) [71, 116], либо являются вспомогательной системой и снабжены лишь подруливающим устройством. Такие системы называются системами параллельного вождения.

Системы параллельного вождения – это технические системы предназначенные для точного управления техникой во время полевых работ. Они снабжены высокоточным спутниковым навигационным оборудованием и позволяют управлять машиной с точностью 20 – 40 см. Также в их состав входит основной модуль для обработки данных и настройки системы, дисплей для вывода указателя курса, подруливающее устройство [71, 94].

В зависимости от сложности исполнения такие системы самостоятельно осуществляют управление движением машиной по прямолинейным, пологим криволинейным, круговым маршрутам. Могут самостоятельно прокладывать параллельный первому проходу маршрут, либо двигаться по заложенному в программу курсу. Работа механизатора при этом заключается в контроле работы системы, выполнении крутых поворотов, разворотов, объезде препятствий. Таким образом, эти системы можно отнести к простейшим системам автопилотирования.

Преимущество таких систем, это универсальность и компактность.

К недостаткам нужно отнести необходимость присутствия оператора и выполнение им части работ.

К **системам управления курсом по обозначенному маршруту (СУОМ)** относятся системы, при которых движение мобильного робота происходит вдоль (по) строго определенных маршрутов.

Реализация этой задачи имеет множество вариантов. Например, движение РТК по рельсам, вдоль металлических трасс или высокочастотного кабеля под напряжением для ориентации по магнитному полю. Движение вдоль нанесенных на рабочей поверхности (полу) контрастных линий. Возможно движение вдоль установленных по маршруту радиомаяков, инфракрасных датчиков, по лучу лазера и т.д. [15, 102, 110, 111, 120].

Эти системы наиболее просты в исполнении и как следствие экономически выгодны. Они могут и с успехом применяются в промышленности, при конвейерном производстве, в цеховых условиях, на складских территориях и т.д. [15, 102].

Однако, в связи с ограничениями по их применению, такими как невозможность использования большинства из них на открытом пространстве, привязанность к строго определенному маршруту, высокая подверженность помехам, сложность при замене маршрута, использование таких систем крайне ограничено. Для применения СУОМ в составе транспортных мобильных роботов требуется переустройство дорожной сети или создание новой, что, при нынешней незначительной роботизации транспорта, не является оправданным. Использование же данных систем управления для строительных машин неприемлемо ввиду особенностей технологий и динамики строительства.

Системы дистанционного управления (СДУ) некоторые источники и авторы [21] не относят к роботизированным системам, однако ГОСТ Р 54344 – 2011 [20] дает нам такое право.

Дистанционное управление РТК может осуществляться различными способами. Наиболее часто встречающиеся, это управление посредством радиосигнала, проводное управление, по лучу лазера и др. [45, 46, 47].

Среди множества видов СДУ, к наиболее простым относятся так называемые биотехнические системы. Это системы, требующие постоянного, непрерывного участия человека в процессе управления. Управление при этом можно разделить на три вида:

- Командное. Оператор формирует команды для того или иного привода исполнительного механизма при помощи кнопочного пульта управления.

- Копирующее. Этот вид управления чаще используется при управлении рабочими органами робота, манипуляторами. При этом оператором используется рукоятка кинематически подобная манипулятору. СДУ копирует движение рукоятки рабочим манипулятором.

- Полуавтоматическое. При этом вместо рукоятки используется джойстик. Такое управление может быть позиционным, по вектору скорости, комбинированным [55].

Большим преимуществом таких систем является возможность роботизации образца, то есть оснащение серийной машины элементами СДУ, что значительно упрощает и удешевляет создание РТК [43].

Однако использование СДУ в дорожных или строительных мобильных РТК не является оправданным, так как активное участие оператора при таком способе управления не выполняет одно из главных требований роботизации – высвобождение человеческого труда, а так же значительно снижает эффективность работ.

Комбинированные системы управления, как следует из определения, могут включать в свой состав несколько различных видов систем. Это значительно повышает надежность РТК, расширяет возможности применения роботов. Системы управления, используемые в РТК, могут быть интегрированными в одну общую систему или иметь отдельную структуру.

Несмотря на видимые различия в устройстве и принципе работы систем управления, можно выделить некоторые общие элементы, являющиеся основой большинства из рассмотренных систем. Условно разобьем их на блоки составляющие систему управления (рисунок 1.6).

- Система навигации предназначена для позиционирования робота в реальном времени, передачи текущих координат управляющей системе. Состав системы навигации зависит от выбора разработчиком системы позиционирования.

- Информационная система предназначена для описания внутреннего состояния робота и описания окружающей обстановки управляющей системе. В состав может входить система технического зрения, различные информационные датчики, сенсоры и т.д.

- Управляющая система анализирует полученные данные и реализует алгоритмы управления мобильным роботом. Состав управляющей системы зависит от сложности системы управления, задач стоящих перед роботом. От управляющего микропроцессора в простых системах, до управляющего компьютера в сложных.

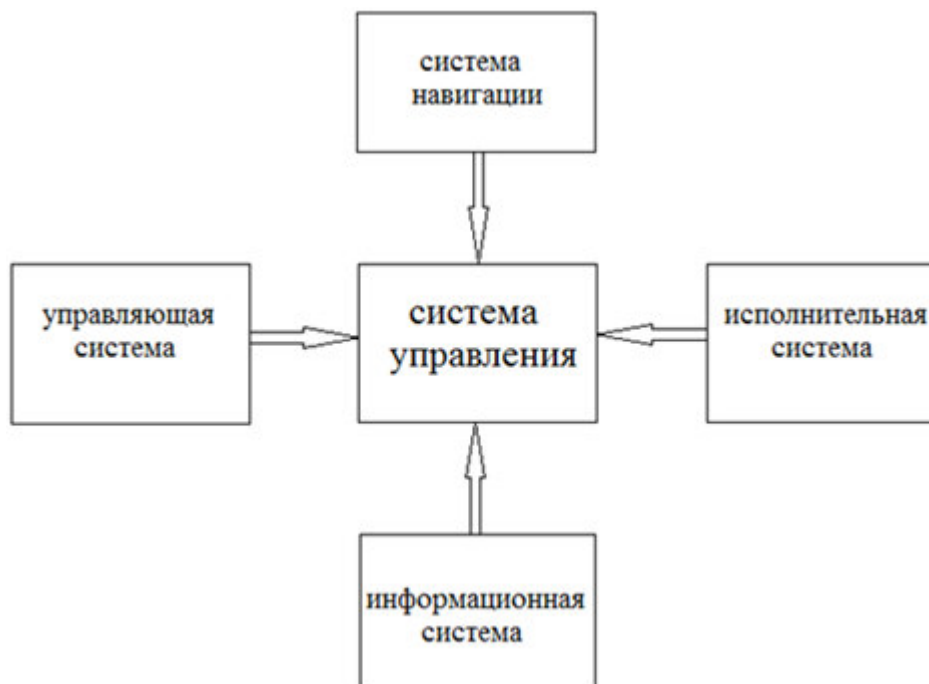


Рисунок 1.6 - Блок – схема системы управления мобильным РТК

- Исполнительная система предназначена для реализации управления. В ее состав входят различные устройства для передачи управляющих воздействий, электроприводы исполнительных механизмов, элементы преобразования сигналов и т.д.

Проведенный в предыдущем параграфе анализ работ выполняемых СДМ, и в частности дорожными катками, показывает, что для внедрения в конструкцию СДМ данного типа требуется СУ, способная вести машину по заданному курсу с заданной, на основе требований нормативной документации, точностью. При этом детерминированные условия строительной площадки и технология работ дорожных катков позволяют отказаться от сложных СУ. Система автопилотирования наиболее полно будет отвечать всем предъявляемым требованиям. Дополнительными доводами в ее пользу будут простота, надежность, эффективность и относительно малая стоимость.

1.4 Анализ элементов роботизированных систем управления мобильных дорожных машин

Работу системы управления обеспечивают четыре основные подсистемы:

- 1) Система навигации и позиционирования;
- 2) Информационная система;
- 3) Исполнительная система;
- 4) Управляющая система.

Системы навигации и позиционирования предназначены для позиционирования робота в реальном времени, передачи текущих координат управляющей системе, а так же параметров движения.

По площади охвата, все существующие системы можно разделить на два класса [12]:

- локальные системы навигации и позиционирования, работающие на ограниченной площади (радиочастотные метки, ультразвуковое позиционирование, инфракрасное позиционирование и т.д.);
- глобальные системы навигации и позиционирования, охватывающие значительные территории и площади (спутниковые системы навигации, системы радионавигации и т.д.).

Каждый класс систем имеет свои преимущества и недостатки. Однако именно ограниченность локальных систем, наличие большего дополнительного оборудования, инфраструктуры и обслуживающего персонала, делает их менее пригодными к использованию в дорожном строительстве по сравнению с глобальными системами.

В настоящее время среди систем навигации и позиционирования наибольшее распространение получили [81]:

- Системы ближней радионавигации;
- Системы инерциальной навигации;
- Системы спутниковой навигации.

Принцип действия систем ближней радионавигации основан на одновременном измерении дальностей от объекта до нескольких стационарных (опорных) навигационных устройств (маяков) с известными координатами [22, 61].

Этот метод известен достаточно давно и широко применяется в авиации для обеспечения взлета – посадки летательных аппаратов. Использование же его для навигации наземных мобильных средств пока не получило широкого распространения в виду ряда причин. К ним относятся более высокая стоимость комплекса, обязательная высокоточная геодезическая привязка опорных маяков, помехозависимость, а так же несколько худшая точность позиционирования по сравнению со спутниковыми навигационными системами [88, 100].

Инерциальная навигация – метод навигации, основанный на свойствах инерции тел. Он заключается в определении ускорения, угловых скоростей исследуемого объекта. Затем, используя полученные данные, производится расчет его скорости, курса, местоположения [82]. Реализация данного способа осуществляется включением в состав комплекса гироскопических устройств, с целью создания системы отсчета и определения углов поворота и наклона объекта, датчиков линейного ускорения, угловых скоростей, вычислительных устройств. Главной отличительной особенностью данного способа навигации является автономность. Его преимущества, это отсутствие требования наличия внешних ориентиров или поступающих из вне сигналов [56]. Однако автономность же приводит, с течением времени, к накоплению ошибки возникающей при выполнении интегрирования сигналов датчиков информационной системы, что в итоге является причиной увеличения погрешности, уменьшения точности позиционирования [82, 100].

Системы спутниковой навигации – наиболее распространенные на сегодняшний день системы навигации и позиционирования. Они представляют собой совокупность технических средств, предназначенных для определения координат местоположения, точного времени и параметров движения исследуемого объекта.

Принцип работы данных систем основан на измерении расстояния от объекта до спутников с известными координатами, находящимися на орбите земли.

Любую систему спутниковой навигации можно условно разделить на три составляющих части:

- Космическая. Состоит из навигационных спутников, являющихся источниками радионавигационных сигналов;

- Наземная. Включает космодром, командно-измерительный комплекс, центр управления. Ее функции, это техническое обеспечение системы, обслуживание, управление и контроль.

- Пользовательская. Включает в себя аппаратуру потребителей. В ее задачи входит прием сигналов со спутников, их измерение и обработка [35].

Аппаратура потребителя состоит из приемника. Приняв и обработав сигнал, приемник вычисляет долготу, широту, высоту над уровнем моря, направление и скорость движения. Полученные данные выводятся на дисплей в виде цифровых значений, либо отображаются на карте. Значения географических координат – широты и долготы, измеряют в градусах.

На рисунке 1.7 упрощенно показана работа системы спутниковой навигации во фронтальной проекции (вид с боку) и в горизонтальной проекции (вид с верху).

В настоящее время в мире существует несколько систем спутниковой навигации. ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), GALILEO (ЕВРОСОЮЗ), BEIDOU (КНР) – глобальные системы. QZSS (Япония), NAVIC (Индия) – региональные системы [49]. Однако, в виду особенностей построения орбитальных группировок спутников, на большей части территории Российской Федерации возможно использование только двух систем – ГЛОНАСС и GPS, являющихся глобальными. Обе эти системы схожи по характеристикам, но дополняя друг друга, повышают надежность и точность позиционирования. В равной мере, они подвержены и факторам, сказывающимся на их эффективности.

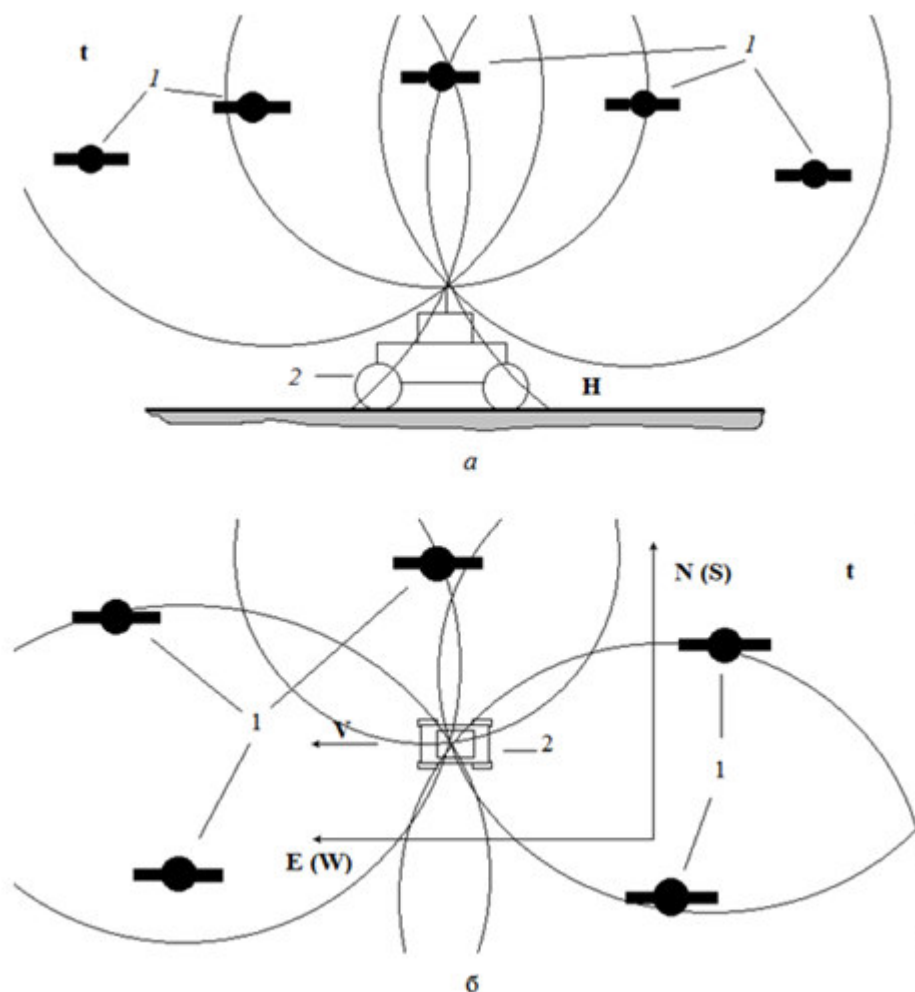


Рисунок 1.7 - Система спутниковой навигации, вид сбоку (а), вид сверху (б):

1 - навигационные спутники; 2 – объект исследования (потребитель); N (S) – широта северная (южная); E (W) – долгота восточная (западная); V – скорость; t – время; H -высота над уровнем моря

К таким факторам относятся системные погрешности, вносимые аппаратурой спутников, погрешности, возникающие на маршруте распространения сигнала от спутника до аппаратуры потребителя, погрешности, возникающие в аппаратуре потребителя [35]. В виду этого погрешности позиционирования современных спутниковых систем достигают иногда нескольких метров. И если потребности большинства потребителей, существующие системы вполне удовлетворяют, то для выполнения некоторых задач, требующих высокую точность позиционирования, таких как навигация

автомобильного транспорта, авиации, строительства автомобильных дорог, геодезические работы и прочие, такие погрешности не приемлемы.

Исправить эту ситуацию позволяет дифференциальный режим позиционирования. Суть его заключается в использовании, совместно с приемником потребителя, одного или нескольких базовых приемников, находящихся в точках с известными координатами. При этом с базовых приемников на приемник потребителя передается корректирующий сигнал, сглаживающий погрешности, обеспечивающий увеличение точности искомых параметров [13, 35, 73, 83].

Работа системы спутниковой навигации в дифференциальном режиме представлена на рисунке 1.8.

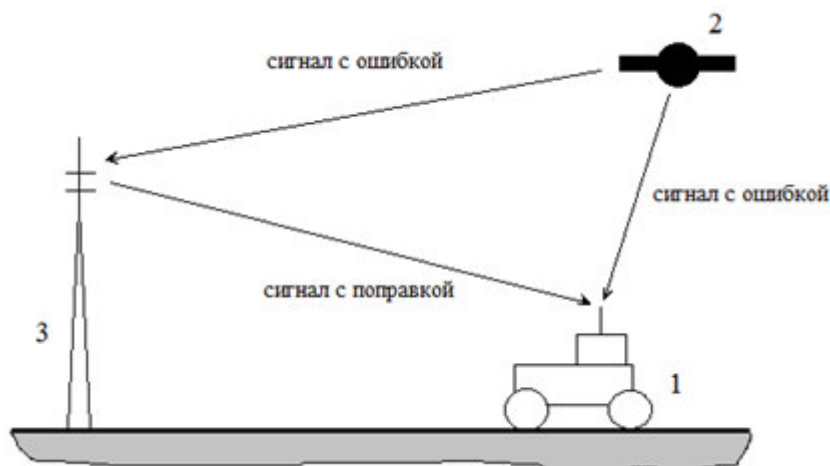


Рисунок 1.8 - Дифференциальный режим позиционирования: 1 – объект исследования (потребитель); 2- навигационный спутник; 3 – базовый приемник

Для покрытия больших территорий, таких, как например Россия, реализация дифференциального режима осуществляется с помощью геостационарных спутников. Такие системы получили название «широкозонные дифференциальные системы» [35].

Для повышения точности и надежности предоставляемых услуг, глобальные навигационные системы обеспечивают потребителя функциональными дополнениями.

Функциональные дополнения представляют собой корректирующую информацию предназначенную устранить или уменьшить погрешности позиционирования, повысить точность определения пространственных координат, скорости движения и времени.

Корректирующая информация функциональных дополнений доводится до потребителя по специальным каналам связи (УКВ радиостанции, интернет, системы подвижной беспроводной связи) [36].

Более подробная информация о функциональных дополнениях глобальных спутниковых навигационных систем представлена на рисунке 1.9.

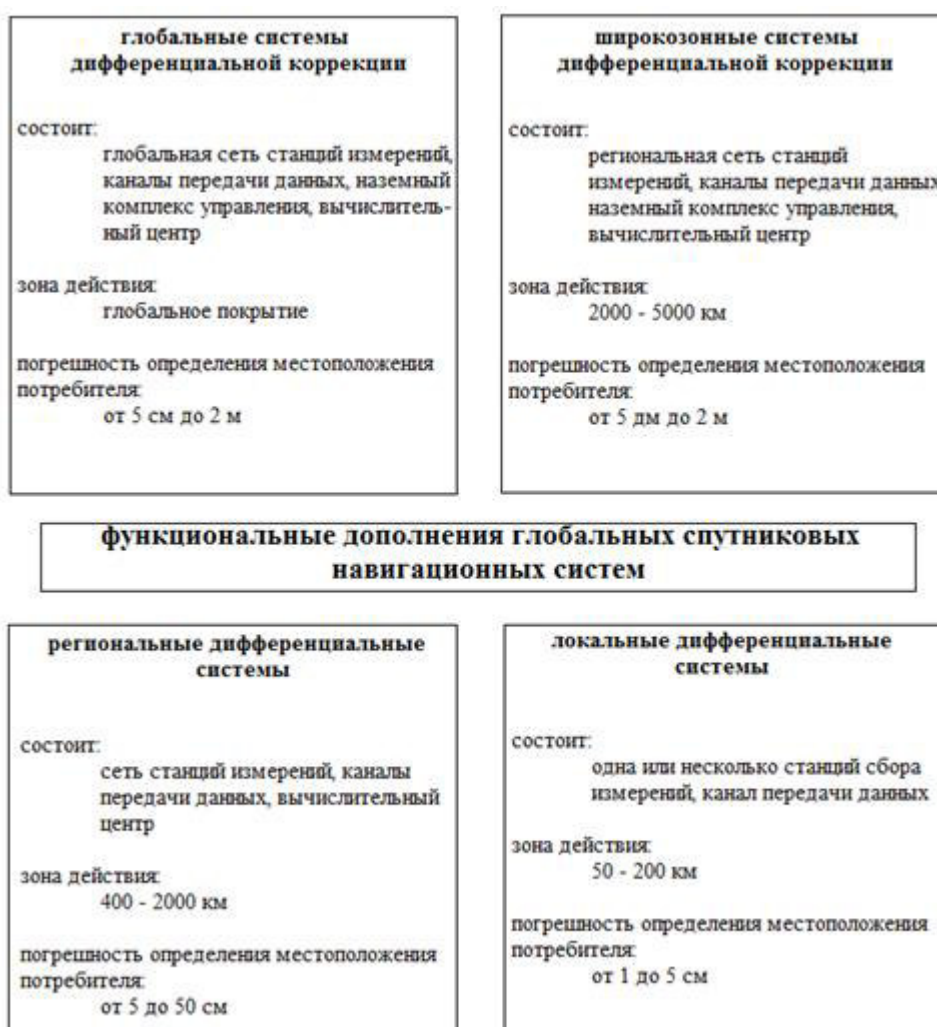


Рисунок 1.9 - Системы функциональных дополнений [36]

На сегодняшний день системы спутниковой навигации и позиционирования способны в полной мере удовлетворить потребности широкого круга потребителей и в том числе обеспечить высокоточную навигацию мобильным объектам, задействованным в дорожном строительстве.

Как пример можно привести приемник Star Fire 6000 компании John Deere. Данный приемник применяется на объектах точного земледелия и может применяться на любых транспортных средствах. Он принимает сигнал с трех геостационарных спутников, совместим с системой ГЛОНАСС, имеет модуль компенсации неровностей рельефа, для автоматической компенсации крена, уклона и рыскания транспортного средства. Обеспечивает точность от прохода к проходу 3 – 15 см, а с использованием базовой станции RTK (Real Time Kinematics – система позиционирования в реальном времени) – 2,5 см [117].

Среди отечественных разработок можно выделить ГНСС - приемник ОС – 213 компании ООО "Ориент Системс" и ООО "4ГНСС", который предназначен для высокоточного определения положения объекта в пространстве (координаты и курс) и идеально подходит для беспилотного транспорта. Его возможности позволяют ориентировать мобильный объект в пространстве с точностью в плане до 8 мм, по высоте до 15 мм (с использованием RTK), точность определения скорости до 0,03 м/с [16].

Информационная система предназначена для описания внутреннего состояния робота и окружающей обстановки управляющей системе. Она осуществляет сбор информации посредством датчиков, сенсоров, систем и передачу ее в систему управления для дальнейшей обработки и использования.

Функционально информационную систему, состав которой представлен на рисунке 1.10 необходимо разделить на внешнюю и внутреннюю.

Основными элементами информационной системы являются датчики. Они служат как правило, главным поставщиком информации для обеих систем (внешней, внутренней).

Датчик является техническим информационным устройством, преобразующим входной сигнал любой физической величины в сигнал, необходимый для дальнейшего использования [106].

Большинство датчиков, в виду подавляющего преимущества данного способа измерений, имеют электрический выходной сигнал. Электрический сигнал удобно передавать на значительные расстояния, скорость его передачи высока, он точно преобразуется в цифровой код и пр. [77, 87].



Рисунок 1.10 - Состав информационной системы мобильного РТК [90]

Кроме датчиков, в информационных системах робототехнических устройств, мобильных роботов, широко применяются системы технического зрения, различные информационные сенсоры: ультразвуковые и лазерные дальномеры, сканирующие лазерные дальномеры (лидары) и т.д.

Состав информационной системы, как и любой другой системы робота, напрямую связан с назначением РТК, задачами стоящими перед ним.

Исполнительная система предназначена для реализации управления. Состоит из исполнительных устройств, элементов преобразования сигналов, устройств для передачи управляющих воздействий.

Исполнительные устройства – это силовые устройства оказывающие регулирующее воздействие на управляемый элемент (орган) в соответствии с сигналом управляющей системы [87].

В состав исполнительных устройств входят:

- исполнительный механизм передающий управляющее воздействие на объект управления;
- регулирующий орган, непосредственно воздействующий на объект управления (обычно путем изменения количества подводимой рабочей среды).

В пневматических исполнительных механизмах рабочим телом является воздух (газ), в гидравлических жидкость. Рабочее усилие в таких системах создается за счет давления сжатого воздуха либо жидкости на поршень, лопасть, мембрану или сильфон.

Электрические исполнительные механизмы подразделяются на электродвигательные (электромашинные) и электромагнитные.

В качестве основного рабочего органа электромашинных исполнительных механизмов используется электрический двигатель постоянного или переменного тока.

В электромагнитных исполнительных механизмах дискретного действия используют электромагниты постоянного или переменного тока, либо постоянные магниты.

Электроприводом является электромеханическая система, предназначенная для движения рабочих органов машины и управления этим движением.

Электрическая часть электропривода состоит из электрического двигателя, преобразовывающего электрическую энергию в механическую и электроаппаратуры, предназначенной для управления двигателем.

Механическая часть зависит от вида работы, выполняемой управляемым органом и движения которое он осуществляет. И может состоять из редуктора, муфты, преобразователя движения и пр. [87, 97]

Отдельно можно выделить комбинированные исполнительные механизмы. В таких механизмах используется несколько видов энергии. Например: электрогидравлические, электропневматические, пневмогидравлические. В таких системах вид энергии управляющего воздействия, как правило, отличается от вида энергии, создающей усилие перемещения.

Регулирующие органы по составу и устройству зависят от объекта управления.

В гидравлических и пневматических системах, по виду воздействия на объект их можно разделить на:

- Дросселирующие. Изменяют сопротивление в системе изменением своего проходного сечения, меняя таким образом расход рабочего тела (вещества). К ним относятся клапаны, краны, диафрагмы и т.д.

- Дозирующие. Создают дозированное поступление рабочего тела (вещества) или энергии к управляемому органу, таким образом изменяют производительность определенных агрегатов. Это компрессоры, насосы, электроусилители мощности и пр.

К электрическим рабочим органам механизмов относят реостаты, фазовращатели [87].

К элементам преобразования сигналов в системах управления относятся аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователи.

АЦП предназначены для преобразования аналоговой величины в цифровой код, пригодный для обработки микропроцессорами, компьютерами и другими устройствами.

В виду сложности преобразований различных физических величин, таких, как например температура (t), давление (P), скорость (V) и прочие, в цифровую форму, в настоящее время способ конвертации этих величин в цифровые

заключается в преобразовании их сначала в электрические, а затем в цифровые [53, 104].

Основными параметрами АЦП являются:

- число разрядов выходного кода, т.е. определение разрешающей способности – минимального изменения величины аналогового сигнала, которое может быть преобразовано в код;
- абсолютная погрешность преобразования;
- дифференциальная нелинейность;
- время преобразования.

АЦП представляют собой интегральные микросхемы.

ЦАП предназначены для преобразования цифрового кода в аналоговый сигнал. Как и АЦП, ЦАП выпускаются в виде интегральных микросхем.

Электрической величиной используемой в АЦП и ЦАП при преобразовании в цифровой код и обратно, является напряжение (U) [53].

К устройствам, предназначенным для передачи управляющих воздействий в исполнительной системе РТК, относят трубопроводы, соединительные рукава, кабели и пр.

Управляющая система предназначена для хранения, обработки (анализа) полученных от информационной системы данных и реализации алгоритмов управления на основании вводной информации и заложенных программ.

Ядром системы управления является управляющий компьютер или микроконтроллер.

Состав управляющей системы, ее конструктивное исполнение, вычислительная мощность напрямую зависят от задач, возлагаемых на нее, особенностей технического процесса, количества исполнительных механизмов, сложности и состава информационной системы. Для применения в более сложных системах, в системах автопилотирования в том числе, необходимо использование электронно-вычислительных машин (компьютеров), т.е. программируемых электронных устройств, предназначенных обрабатывать данные и производить расчеты, а также осуществлять управление электронными устройствами.

Кроме того структура и состав управляющей системы СА должна соответствовать ряду требований, предъявляемых к управляющим системам мобильных РТК, таким как:

- 1) Модульное исполнение. Такой вариант повышает ремонтпригодность, «гибкость» системы, т.е. способность к модернизации и пр.
- 2) Многофункциональность (универсальность) – отсутствие привязки к объекту управления.
- 3) Единство конструктивного исполнения и т.д. [23].

Проанализировав подсистемы и элементы СА СДМ можно определить состав системы управления движением и курсом конкретной дорожной строительной машины. За образец взят каток вибрационный трехосный трехвальцовый ДУ-107.

Основными органами управления, обеспечивающими движение катка и его управление по курсу, являются:

- 1) Руль.
- 2) Рычаг механизма реверса. Механизм имеет три положения:
 - рычаг вперед – движение катка вперед;
 - рычаг назад – движение катка назад;
 - нейтральное (среднее) положение – остановка катка.
- 3) Рукоятка регулировки подачи топлива. Движение рукоятки вверх - увеличение подачи топлива (увеличение оборотов двигателя, увеличение скорости движения), движение рукоятки вниз – уменьшение подачи топлива.
- 4) Рычаг тормоза. Верхнее положение рычага – включение стояночного тормоза, нижнее положение рычага – выключение стояночного тормоза.

Для приведения катка в движение следует:

- запустить двигатель;
- выключить стояночный тормоз рычагом;
- установить подачу топлива, соответствующую номинальным

оборотах двигателя, рукояткой регулировки подачи топлива;
- рычаг механизма реверса плавно подвинуть вперед или назад, в зависимости от нужного направления движения.

Для остановки катка необходимо:

- плавно перевести рычаг механизма реверса в нейтральное положение;
- включить стояночный тормоз рычагом;
- уменьшить подачу топлива рукояткой до холостых оборотов двигателя.

Запрещается движение катка с включенным стояночным тормозом [38]!

Управление курсом во время движения катка осуществляется посредством вращения рулевого колеса.

Изменение скорости движения производится увеличением или уменьшением подачи топлива рукояткой регулировки подачи топлива.

Таким образом, реализация системы автопилотирования на данной машине будет осуществляться внедрением в ее состав (устройство):

- 1) Управляющей системы.
- 2) Системы навигации и позиционирования.
- 3) Информационной системы.
- 4) Исполнительной системы оказывающей расчетные воздействия на органы управления.

На рисунке 1.11 показана схема размещения элементов роботизированной системы управления на машине.

Схема работы данной системы показана на рисунке 1.12

Основой СА ДУ-107 будет являться управляющий компьютер, выполняющий роль управляющей системы.

В качестве системы навигации и позиционирования необходимо использовать GPS, ГЛОНАСС приемник имеющий возможность использовать функциональные дополнения навигационных систем, региональные, локальные дифференциальные системы, базовые станции RTK. Что позволит обеспечить позиционирование машины с точностью до 2,5 см.

Для определения угла поворота поворотного вальца, а так же изменения угла положения рукоятки регулировки подачи топлива, наиболее подходящими являются датчики угла поворота.

Их задача, это преобразование угла поворота вращающегося вала в аналоговый (электрический) сигнал, позволяющий управляющей системе определять угол его поворота, направление поворота и угловую скорость.

Различают несколько типов датчиков угла поворота использующих различные физические принципы измерений [31, 34, 77]:

- потенциометрические,
- оптические,
- магниторезистивные.

Наибольшее распространение в автомобилестроении получили магниторезистивные датчики, являющиеся бесконтактными.

Примером таких датчиков может являться сдвоенный датчик КМА 220 компании NXP Semiconductors. Он состоит из двух магниторезистивных датчиков и схемы обработки. Такое решение удешевляет устройство, не требует дополнительных навесных элементов, экономит место. Данные датчики ориентированы в первую очередь на применение в автомобилестроении.

Основные технические характеристики датчика КМА 220 [121]:

- два независимых датчика;
- напряжение питания 4,5-5,5 В;
- внешняя сила магнитного поля 35 кА/м;
- программируемая пользователем установка от 0° до углового диапазона;
- готовность микросхемы к работе без использования внешних элементов;
- расширенный диапазон рабочих температур - 40...160° С;
- защита от перенапряжения до 16 В;
- схема определения потери магнита и питания;
- заводская калибровка.

Опыт применения и технические характеристики датчиков данного типа, делают оправданным их использование в СУ роботизированного ДУ-107.

Для контроля положения рычага механизма реверса и рычага стояночного тормоза наиболее правильным представляется использовать датчики положения (датчики положения рабочего органа). Выбор таких датчиков достаточно широк. По принципу работы их можно разделить на контактные и бесконтактные.

К бесконтактным относятся:

- индуктивные;
- фотоэлектрические;
- магнитные;
- емкостные;
- ультразвуковые и т.д.

Такие датчики не имеют механического контакта с подвижным объектом контроля. Их преимущество, это быстродействие и увеличенный ресурс. К недостаткам относится зависимость их точности от напряжения питания, температуры и других факторов.

К контактным, относятся механические датчики положения – концевые выключатели. Они состоят из электрических контактов, которые автоматически замыкаются или размыкаются, при достижении определенного положения объектом контроля. Наличие подвижных элементов в составе таких датчиков можно отнести к их недостаткам. Однако, простота устройства, многообразие исполнения датчиков, устойчивость к различным неблагоприятным факторам и как следствие надежность, делают оправданным их использование в СА ДУ-107.

В виду особенностей технического устройства, а так же исходя из задач стоящих перед исполнительными механизмами СА ДУ-107, в системе автопилотирования для реализации управления необходимо применять электромашинные исполнительные механизмы – электроприводы. Данные элементы системы управления следует разместить непосредственно на рулевой колонке машины, органах управления (рычагах) механизма реверса, стояночного тормоза, рукоятке регулировки подачи топлива.

Для определения коэффициента уплотнения уплотняемого слоя, целесообразно использовать георадар. Примером может служить прибор

разработки научно - производственного центра ГЕОТЕХ, георадар ОКО – 3, предназначенный для проведения скоростного мониторинга автодорожных покрытий. В числе задач выполняемых прибором: определение толщин и структуры конструктивных слоев дорожной одежды; выделение просадок в слоях дорожной одежды и естественного основания; определение геометрии кровли естественного основания; контроль соответствия строения дорожной одежды проектной документации и др. [17].

Проведенный анализ существующих систем навигации и позиционирования, элементов информационных систем, исполнительных механизмов и приводов, позволяет сформировать образ и состав СУ роботизированного дорожного катка – СА, способной обеспечить его управление, выполнение технологических операций по уплотнению дорожных оснований и покрытий, обеспечить точность проектных значений элементов дорожного полотна, определяемую нормативной документацией (таблица 1.1).

1.5 Обзор предшествующих работ в области моделирования роботизированных СДМ

Целью математического моделирования, в частности роботизированных СДМ, является изучение природы сложной динамической системы состоящей из совокупности подсистем «СДМ», «Роботизированная СУ», «Рабочая среда», принципы взаимодействия и поведения подсистем, возможностей ее структурного развития.

В настоящее время, отечественные и зарубежные источники, предоставляют значительное количество математических моделей СДМ. Их сложность напрямую связана с целью, характером, направлением и объектом проводимых исследований.

Моделирование роботизированных дорожных катков, принципы и законы движения машин данного вида по заданному маршруту, неразрывно связано с

изучением, исследованием кинематики движения, динамических свойств объекта исследования.

В Российской Федерации научные исследования в этом направлении ведут ведущие ВУЗы страны: МГТУ им. Баумана, МГУ им. Ломоносова, МАДИ, СибАДИ, ОмГТУ, ЮУрГУ, ЮРГПУ, АлГТУ, ТПУ и др. Научными вопросами теории автомобиля занимались и занимаются такие ученые, как: А.Н. Островцев, Е.А. Чудаков, Г.А. Смирнов, А.А. Бронберг, А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин, В.Ф. Родионов, Б.М. Фиттерман, В.В. Осепчугов, М.С. Высоцкий, Ю.Ю. Беленький, А.А. Юрчевский, А.Н. Нарбут, В.И. Баловнев, А.Н. Зеленин, А.Ш. Хусаинов, И.С. Туревский и многие другие.

В СибАДИ научными вопросами математического моделирования дорожных машин в этой части занимались: А.И. Анохин, К.А. Артемьев, Т.В. Алексеева, В.С. Щербаков, П.А. Корчагин, В.А. Мещеряков, В.Б. Пермяков, А.А. Портнова и др.

Наиболее близкими к дорожным каткам, достаточно изучены и описаны, модели движения по заданному курсу СДМ имеющих колесную базу. Особенностью машин данного типа является наличие эластичных шин, достаточно большие скорости движения. Данные факторы определяют характер взаимодействия с опорной поверхностью (рабочей средой), отражаются на динамических характеристиках, оказывают влияние на модель поворота СДМ.

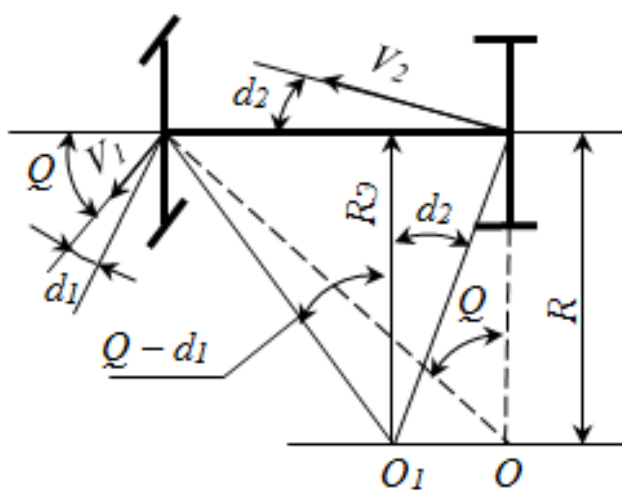


Рисунок 1.13 – Смещение центра поворота при уводе эластичных шин

Наличие увода эластичных шин приводит к смещению центра поворота O (рисунок 1.13). Радиус поворота движителя с эластичными шинами $R_{\text{э}}$, где $\delta 1, \delta 2$ - углы увода шин соответственно переднего и заднего мостов, Q – угол поворота управляемых колес будет [107]

$$R_{\text{э}} = L / \operatorname{tg} (Q - \delta 1) + \operatorname{tg} \delta 2 \quad (1.1)$$

Для автомобиля с жесткими шинами $\delta 1 = \delta 2 = 0$

$$R = L / \operatorname{tg} Q \quad (1.2)$$

В работах Тарасика В.П. [91], Литвинова А.С., [54], Вахламова В.С.[11], Умняшкина В.А. [96] содержатся научные разработки и методические подходы к изучению физических свойств транспортных средств. Представлено математическое описание вопросов теории движения. Теоретическое подтверждение, выводы формул и создание математических моделей движения. Рассмотрены вопросы кинематики криволинейного движения. Отдельно рассмотрены вопросы маневренности и других эксплуатационных свойств транспортного средства, связанных с маневренностью (управляемость, устойчивость и др.). Описано влияние эксплуатационных и конструктивных факторов на маневренность машины. Обоснованы выводы по повышению маневренности.

В работе Портновой А.А. [72] Рассмотрены вопросы повышения маневренности автогрейдера, совершенствование конструкции базовых машин. Был исследован процесс поворота автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой, закономерности процесса поворота. Разработанная математическая модель сложной динамической системы автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой (ШСР) позволяет рассчитывать оптимальное положение шарнира на базе автогрейдера, коэффициент пропорциональности между углами поворота передних управляемых колес и складывания ШСР, обеспечивающий движение передних и задних колес по одной колее, что повышает маневренность автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой в стесненных условиях.

В работе Валекжанина А.И. [10] рассмотрены вопросы повышения маневренности шарнирно-соединенных мобильных машин (ШСММ).

Разработанная математическая модель движения ШСММ, учитывает создание момента сопротивления взаимному повороту звеньев ШСММ и позволяет исследовать влияние устройств для предотвращения складывания на маневренность ШСММ. Исследовано влияние момента сопротивления взаимному повороту звеньев шарнирно-соединенной мобильной машины на ее маневренность, получены зависимости изменения угла складывания и поперечного смещения центра масс звеньев шарнирно-соединенной мобильной машины от момента, создаваемого устройством для предотвращения складывания, при выполнении различных маневров.

Однако моделирование дорожных катков с гладкими, жесткими вальцами будет иметь значительные и принципиальные отличия от представленных выше СДМ.

Жесткие вальцы, а также крайне малые скорости движения отражаются на характере взаимодействия СДМ с опорной поверхностью в виде характерных связей, а так же влияют на модель поворота отсутствием либо крайне незначительными значениями центробежной силы, бокового ускорения и др..

Несмотря на достаточное количество математических моделей дорожных катков, акцент в этих работах ставился на процессе уплотнения материалов. Так в СибАДИ эти вопросы достаточно проработаны и освещены в работах Пермякова В.Б., Захаренко А.В., Савельева С.В., и др..

В работах Пермякова В.Б. [67, 68] описывается методика, позволяющая определять, для катков разных классов оптимальные контактные давления, рабочие скорости и количество проходов по одному следу, при уплотнении дорожных оснований и покрытий. Обосновываются эффективные режимы работы уплотняющих средств. Методика учитывает состав и температуру уплотняемого материала.

С.В. Савельев в своих работах [79, 80] исследует закономерности процессов, протекающих в рабочей среде при уплотнении различными уплотняющими машинами. Предлагаются новые конструкции катков с

адаптирующимися под свойства грунта рабочими органами. Представлены методики расчета и обоснования параметров дорожных катков.

В работе Михеева В.В., Савельева С.В. [60] исследуется вопрос моделирования процесса взаимодействия активной области рабочей среды в зоне контакта с рабочим органом дорожного катка, моделировании сосредоточенной массы рабочей области. Описаны силы, возникающие в уплотняемом материале, отражающиеся на модели катка реакциями опорной поверхности и влияющие на динамическую модель машины.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial E}{\partial z} = F(z, \dot{z}, t) + F_{\text{тр}}, \quad (1.3)$$

где $E(z, \dot{z}) = \frac{m(z)\dot{z}^2}{2}$ – кинетическая энергия активной области уплотняемого материала, $F(z, \dot{z}, t)$ – силы действующие на материал: внешние – обусловленные динамическим нагружением от рабочего органа; внутренние.

Так же Михеевым В.В. в работе [59] разработана математическая модель работы катка при уплотнении грунта и выявлен комплексный характер влияния параметров дорожных катков, режимов работы, физико-механических свойств рабочей среды на энергоэффективность процесса уплотнения.

В работе [105] Шишкина Е.А. исследован процесс взаимодействия гладкого вальца с асфальтобетонной смесью. Разработана математическая модель отражающая характер поведения уплотняемого материала при взаимодействии с рабочим органом катка. В результате исследования разработан алгоритм выбора и расчета режимов работы механизированного звена машин по укладке и уплотнению асфальтобетонной смеси.

Работа Кондрашова Н.А. [44] посвящена исследованию и расчету параметров многофункционального катка для уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий. Уточняется математическая модель процесса взаимодействия рабочих органов с рабочей средой с учетом состава материала. Автором разработана методика расчета параметров дорожного катка и режимов его работы, позволяющая повысить эффективность процесса уплотнения.

Вопросы движения дорожного катка по маршруту не изучались. Однако, опыт моделирования взаимодействия рабочего органа – вальца с уплотняемым материалом (рабочей средой) позволяет в части моделирования взаимодействия подсистем «СДМ» ↔ «Рабочая среда» взять за основу существующие математические модели.

Для решения задач управления роботизированными СДМ при движении по заданной траектории, разработано множество методов.

В работе Сухарева Р.Ю. [89] Предложена концепция повышения эффективности колесных ДСМ путем внедрения систем автономного управления, идентифицированы функции, которые должна выполнять перспективная система автономного управления, разработана блок-схема рабочего процесса ДСМ с перспективной системой автономного управления. Предложена классификация существующих систем управления ДСМ на основе идентификации функций управления, в которую добавлен класс перспективных систем автономного управления. Разработана математическая модель сложной динамической системы рабочего процесса ДСМ. Разработан новый копирный метод управления колесной ДСМ, точность которого в среднем на 23% лучше метода «чистое преследование», и в среднем на 54% лучше метода «Стэнли».

В работе дано описание существующих методов управления. К ним относятся: управление по одной путевой точке, управление по двум путевым точкам, управление по непрерывной траектории, подразделяющийся на: метод «чистое преследование»; метод Стэнли; копирный метод управления и др.

При этом задача алгоритма управления может быть разделена на построение траектории СДМ до начала движения и коррекция траектории в процессе движения, в случае отклонения от указанного маршрута.

Учитывая особенности технологии работ выполняемых дорожными катками, а также принцип работы предлагаемой СУ – СА, наиболее предпочтительным будет являться копирный метод управления, предложенный в работе Сухарева Р.Ю. принцип которого сводится к совмещению положения

точки копирования – точки на продольной оси роботизированного дорожного катка, и заданной траектории.

Расчетная схема метода представлена на рисунке 1.14.

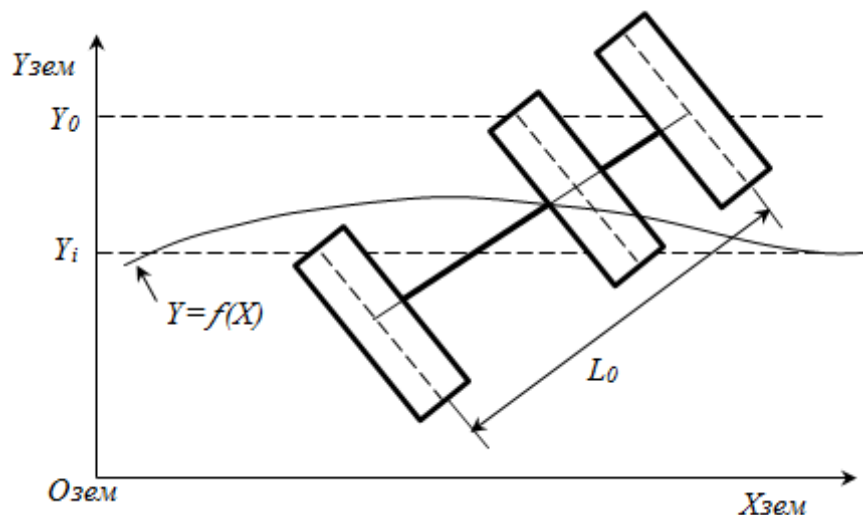


Рисунок 1.14 – Расчетная схема копирного метода управления [89]

Основа метода – измерение отклонения копирной точки $\Delta Y = Y_0 - Y_i$ от заданной траектории $Y = f(X)$. Целевая функция управления $\Delta Y \rightarrow 0$ [89].

В настоящее время производителями Liu Gong (Китай), Volvo и др. представляют концепты беспилотных (роботизированных) дорожных катков. Однако в печати и научной литературе пока отсутствуют сведения и материалы о применяемых принципах управления, СУ, алгоритмах и моделях управления.

Таким образом, проведенный анализ показал отсутствие существующих математических моделей движения по заданной траектории роботизированных дорожных катков. Вместе с тем, при разработке математических моделей возможно, качестве основы, использование готовых методов, разработок и моделей.

1.6 Выводы по главе. Цели и задачи исследования

Проведенный анализ состояния вопроса роботизации строительных дорожных машин показал перспективность и актуальность темы. Работы в

данном направлении в нашей стране и в мире ведут ведущие вузы и НИИ. При этом, роботизация именно строительных машин не достаточно хорошо исследована и имеет широкие перспективы.

Проанализированы требования нормативной документации, предъявляемые к элементам дорожных оснований и покрытий, на их основании выведен критерий эффективности.

Сформированы требования и образ роботизированной СУ дорожного катка, обеспечивающий выполнение требований нормативной документации по соблюдению точности проектных значений элементов дорог.

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

Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

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.

2. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Общая методика исследования

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 опирается на сочетание общенаучных, статистических, математических и экспериментальных методов.

Основой данного метода будет рассмотрение сложной системы, как совокупности составляющих ее элементов (объектов) [18, 50].

Суть системного анализа в данной работе проявляется в рассмотрении роботизированной СДМ в виде сложной системы моделей, являющейся совокупностью отдельных, взаимосвязанных подсистем, объединенных причинно-следственными связями.

Таковыми подсистемами будут являться «роботизированная система управления», «СДМ», «Рабочая среда». Они представляют собой модели роботизированной системы управления, дорожного катка, построенные на основании и в соответствии с конструктивными, и эксплуатационными характеристиками, и параметрами систем. С учетом особенностей эксплуатации дорожного катка, выраженных в результатах взаимодействия рабочих органов катка – вальцов с уплотняемым материалом дорожных оснований и покрытий, зависящих от его характеристик.

Основными принципами системного подхода будут: целостность, сложность и организованность системы, или, другими словами, её структурированность, т.е. связанность и взаимозависимость составляющих её элементов, подчиненность организации всей системы определенной задаче, её иерархичность [50, 74].

Данные принципы выражаются в возможности представления и описания исследуемой системы способом ее структуризации в виде построения

конструкции связей и отношений элементов, подсистем, составляющих ее, обусловленностью поведения элементов, и системы в целом, а так же, свойствами ее структуры [65, 93].

Таким образом, свойства и особенности рабочего процесса уплотнения дорожного полотна (покрытия) катком необходимо рассматривать исключительно в зависимости от свойств рабочей среды, что не возможно без изучения данных свойств, чем и будет выражен принцип взаимосвязанности, структурированности и иерархичности [1, 93].

Поставленные в диссертационной работе задачи решаются теоретическими и экспериментальными методами исследования.

Решение вопросов теоретического исследования осуществляется методом аналитического исследования и методом математического моделирования с использованием программы MATLAB на ЭВМ. Их цель – установление основных закономерностей работы общей динамической системы «Роботизированная СУ», «СДМ», «рабочая среда» и отдельных ее подсистем и элементов.

Экспериментальные исследования призваны оценить адекватность математической модели, подтвердить правильность технических решений, выводов численных значений конструктивных, эксплуатационных параметров и др [1].

Метод системного анализа, для решения поставленных в работе задач, определяет следующие этапы:

- постановка задачи (определение объема, цели и задач исследования);
- очерчивание границ изучаемой системы, определение ее структуры.

Составление структурной схемы рабочего процесса уплотнения дорожного полотна (покрытия) роботизированной СДМ. Выделение составных частей (подсистем) системы, закономерностей их взаимодействия;

- составление математической модели системы на основе обобщения математических моделей подсистем, с учетом законов их взаимодействия;
- анализ полученной математической модели с целью ее оптимизации;

- теоритические исследования рабочего процесса роботизированной СДМ, с целью подтверждения работоспособности, адекватности математической модели, выявления и численного определения зависимостей конструктивных и эксплуатационных параметров;

- анализ данных, при необходимости доработка предложенных технических решений;

- выводы, определение и оценка эффективности предложенных решений [50, 48].

2.2 Методика теоритических исследований

Для корректного отражения свойств исследуемой динамической системы, ее подсистем, связей между элементами, в теоритических исследованиях широко применяются математические модели, которые являются основой данных исследований [1, 84].

Объект исследования в теоритических исследованиях всегда идеализирован.

Это значит, что не имеющими большого значения и влияния на физические процессы при исследовании объекта параметрами пренебрегают, позволяя вводить в исследования различные допущения. От правильности принятых допущений зависит степень идеализации объекта [93].

Формы представления математической модели различны. Модель может быть представлена графически в виде графиков, диаграмм, структурных схем, алгоритмов, частотных, временных характеристик и т.д.

В данной работе математическая модель представлена в виде системы уравнений.

Однако, независимо от вида и формы представления математической модели, к ним всем предъявляются одинаковые требования.

Основными свойствами, которыми должны обладать математические модели, являются [32]:

- адекватность – модель должна отражать заданные свойства с достаточной точностью;
- простота – меньшее количество факторов при расчете, при том же результате;
- потенциальность – возможность получения новых знаний об исследуемом объекте;
- универсальность – определяется числом и составом входных и выходных параметров;
- экономичность – характеризуется затратами вычислительных ресурсов для ее реализации;
- точность результатов – надежность функционирования модели;
- достаточность;
- способность к развитию без кардинальной переделки основы.

Виды уравнений, выбранных для реализации принятой математической модели, должны соответствовать ее уровню, в полной мере и с достаточной точностью обеспечивать цели разработанной математической модели:

- изучить и понять структуру объекта исследования, свойства, внутренние связи;
- научиться управлять объектом (процессом);
- прогнозировать прямые и косвенные последствия воздействия на объект [32].

Метод исследования путем решения системы уравнений при помощи ЭВМ называют «вычислительный эксперимент» [1].

Другими словами, вычислительный эксперимент – это эксперимент над математической моделью исследуемой системы на ЭВМ, суть которого заключается в вычислении искомых параметров системы (модели) по другим, вводным параметрам. И на основе полученных данных дать заключение по свойствам системы.

Этапы вычислительного эксперимента [32]:

- построение математической модели;

- разработка методов расчета;
- программирование;
- расчеты на ЭВМ;
- сравнение результатов расчетов с данными опытов;
- уточнение модели (при необходимости).

Вычислительный эксперимент дает возможность варьировать параметрами исследуемого процесса в установленном диапазоне и любой момент времени. Позволяет моделировать условия, воспроизведение которых в реальных условиях не возможно. Сокращает временные и экономические затраты.

В данной работе вычислительный эксперимент проводился на ЭВМ с использованием программного продукта MATLAB. Программный продукт MATLAB обладает необходимым набором встроенных функций и пакетом расширений, позволяющими производить все необходимые расчеты и анализ различного рода данных, проводить математическое моделирование. Исходные данные вводятся в программу в виде М-файла составленного на языке программирования MATLAB [2, 3].

2.3 Методика экспериментальных исследований

Одним из ключевых этапов работы и неотъемлемой частью системного подхода в исследовании объекта является проведение экспериментальных исследований.

К типичным задачам ставящимся исследователем можно отнести [24, 75, 76, 93]:

- подтверждение адекватности разработанной математической модели;
- оценка изучаемых характеристик исследуемого объекта, проявляющих себя статистически;
- оценка влияния на выходную величину различных факторов;
- выявление оптимальных условий, факторов протекания процесса;
- оценка эффективности инженерных решений.

Экспериментальные исследования можно разбить на следующие этапы [75]:

- постановка задачи;
- предварительный анализ (сбор информации);
- определение способа решения;
- эксперимент;
- анализ и интерпретация результатов.

Способы проведения экспериментальных исследований различают на пассивный и активный.

Пассивный эксперимент проводится без вмешательства в процесс до его завершения. Информация об исследуемом объекте накапливается путем наблюдения в условиях стандартного (типичного) функционирования объекта. Обработка полученных экспериментальных данных осуществляется только после окончания эксперимента [1, 57].

Активный эксперимент отличается применением искусственного воздействия на объект в ходе и на протяжении проведения эксперимента. При этом, возмущающие воздействия оказываются на объект по заранее спланированной программе.

Активный эксперимент позволяет быстрее устанавливать закономерности функционирования объекта, минимизировать число измерений, быстрее находить оптимальные режимы, корректировать математическую модель [1, 57].

В данной работе были использованы методы активного и пассивного эксперимента.

Условия выполнения эксперимента в полной мере отвечали требованиям, предъявляемым к объекту исследования при активном эксперименте:

- возможность воспроизведения результатов эксперимента на объекте исследования;
- объект исследования должен быть управляемым.

На основании результатов экспериментальных исследований, закономерностью, обоснованностью выводов, сделанных при исследовании математической модели, подтверждается ее адекватность, т.е. способность

математической модели корректно и точно, с заданной погрешностью, отображать характеристики изучаемой системы при варьировании ее параметрами.

Данный процесс включает в себя три основных этапа:

- 1) Машинный эксперимент;
- 2) Натурный эксперимент.

Цель данных этапов – сбор и анализ необходимого массива теоретических и экспериментальных данных.

- 3) Сопоставление данных полученных в ходе теоретических и экспериментальных исследований и их анализ [18, 93].

При планировании экспериментальных исследований, для получения полных и всеобъемлющих данных, необходимо в полной мере учитывать все влияющие на процесс факторы – величины влияющие на процесс и имеющие определенное значение, их количественные и качественные состояния, именуемые уровнями фактора [75].

Число опытов планируемых при эксперименте, к числу уровней будет представлять зависимость [75]

$$n_{\text{изм}} = P^k, \quad (2.1)$$

где $n_{\text{изм}}$ – число опытов; P – число уровней факторов; k – число факторов.

Для проверки достоверности полученных экспериментальных данных, в работе использовался показатель – доверительная вероятность (ρ). Это показатель определяющий достоверность, надежность полученных данных. В данной диссертационной работе $\rho \approx 0,95$ [93].

С учетом ρ , формула расчета $n_{\text{изм}}$ будет иметь вид неравенства [75]

$$n_{\text{изм}} \geq \left[\frac{t(\rho)}{\varepsilon} \right]^2 \cdot S, \quad (2.2)$$

где ρ – доверительная вероятность (надежность данных); ε – доверительная оценка; S – дисперсия выборки (среднее арифметическое квадратов отклонений выборки от их среднего) [75]

$$S^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n-1}, \quad (2.3)$$

Случайная ошибка результатов измерений, как правило, оценивается значением среднеквадратичной ошибки серии измерений [75]

$$S_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{изм}}} \Delta y^2}{n_{\text{изм}}(n_{\text{изм}}-1)}}, \quad (2.4)$$

где Δy – абсолютное значение разности между средним значением измеряемой величины и результатом отдельных измерений; $n_{\text{изм}}$ – число измерений.

Формула значения абсолютной погрешности будет иметь вид [75, 18]

$$\Delta x = t_{\alpha, n} \cdot S_{\bar{y}}, \quad (2.5)$$

где $t_{\alpha, n}$ – коэффициент Стьюдента; α – величина надежности (для практических задач обычно $\alpha = 0,95$) [18].

Результат измерения будет иметь вид [75]

$$y = \bar{y} \pm \Delta y, \quad (2.6)$$

где \bar{y} – среднее значение измеряемой величины.

Среднее значение выборки m_x находилось для исключения грубых ошибок по данным выборки $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ [75, 50]

$$m_x = \frac{1}{n_{\text{изм}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{изм}}} 1, \quad (2.7)$$

И дисперсия выборки [75, 50]

$$S_x = \frac{1}{n_{\text{изм}}-1} \sum_{i=1}^{n_{\text{изм}}} (x_i - m_x)^2, \quad (2.8)$$

где $n_{\text{изм}}$ – число наблюдений; x_i – значение i – го наблюдения.

Для изучения оценки и влияния одного или нескольких факторов на результат наблюдений, используют дисперсионный анализ. В случае, когда результаты исследования зависят от нескольких независимых друг от друга факторов, то допускается разделение вкладов этих факторов, анализируя соотношения между их дисперсиями. Такие дисперсии будут называться:

- Межгрупповая δ^2 – вариация обусловленная влиянием фактора, положенного в основу группировки факторов.

Будет определяться по формуле [75]

$$S_{\delta}^2 = \frac{\sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{x}_0)^2 f_j}{k-1}, \quad (2.9)$$

где f_j - число единиц в j - й группе; \bar{x}_j - частное среднее по j - й группе; \bar{x}_0 - общее число по совокупности единиц.

- Внутригрупповая σ_j^2 - вариация обусловленная влиянием прочих факторов в каждой группе

Ее значение [75]

$$S_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^{f_j} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{f_j - 1}. \quad (2.10)$$

Оценка средней из внутригрупповых дисперсий является среднеквадратическим отклонением [75]

$$\bar{S}^2 = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{f_j} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n - k}. \quad (2.11)$$

Общее дисперсионное отношение будет иметь вид [75]

$$F = \frac{S_{\delta}^2}{\bar{S}^2}. \quad (2.12)$$

Проверяя значимость результатов (случайно ли отклонение двух дисперсий) необходимо учитывать число степеней свободы. При расчете межгрупповой дисперсии, число степеней свободы равно $d \cdot f_1 = k - 1$, внутригрупповой $d \cdot f_2 = n - k$.

Предельный размер отклонений внутригрупповой дисперсии от общей устанавливается по таблицам F_T - Фишера. Вычисленный экспериментально F критерий сравнивают с F_T . В случае, если $F > F_T$, то с заданной вероятностью, коэффициент детерминации признается значимым, результативный и факторный признак взаимосвязаны [75].

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛОЖНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «РАБОЧАЯ СРЕДА – ДОРОЖНЫЙ КАТОК – СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ»

Математическая модель роботизированного дорожного катка может быть представлена в виде совокупности моделей описывающих элементы подсистем, упорядоченно взаимодействующих между собой, при этом выходные данные одной модели являются входными для другой.

Основными моделями, позволяющими описать движения роботизированного катка выполняющего технологические операции по уплотнению основания, являются:

- динамическая модель катка, взаимодействующего с уплотняемым основанием, позволяющая определить основные динамические характеристики катка;

- модель поворота катка, позволяющая определить траектории движения характерных точек катка при движении по заданной траектории;

- модель, описывающая систему управления, обеспечивающую управление силовой установкой, органами управления катка для обеспечения движения катка с необходимой скоростью, заданной траекторией и выполнения необходимых технологических операций.

- модель рабочей среды – уплотняемого материала, описывающая основные силы, возникающие в уплотняемом материале при взаимодействии с рабочими органами и оказывающие влияние на динамическую модель катка.

3.1 Математическая модель дорожного катка

Проведенный анализ показал, что существует большое количество математических моделей описывающих процесс уплотнения материала статическими и вибрационными катками с жесткими вальцами, которые могут

быть взяты за основу и применены для составления модели динамической подсистемы «опорная поверхность – каток».

Математическое описание катка базируется на следующих допущениях:

- все связи, наложенные на систему являются голономными и стационарными;
- элементы катка представлены как абсолютно жесткие тела, звенья;
- люфты в шарнирах отсутствуют;
- вальцы имеют постоянный контакт с поверхностью;
- каток представлен как шарнирно сочлененный многозвенник;
- физико-механические свойства материала в зоне контакта вальца с поверхностью однородны.

Трехвальцовый вибрационный каток с шарнирно-сочлененной рамой может быть представлен в виде двухмассовой модели. Первое звено массой m_1 образует блок передних неповоротных валцов с силовой установкой, вибровозбудителем. Второе звено массой m_2 образует, поворотный валец, сиденье оператора, оператор. Расчетная схема катка представлена на рисунке 3.1.

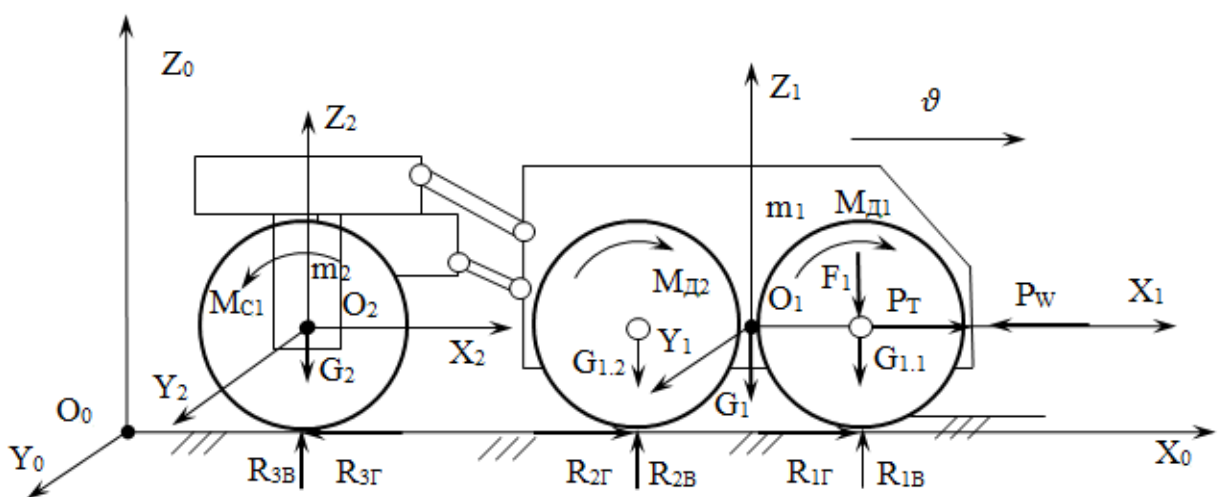


Рисунок 3.1 – Расчетная схема катка

Динамическая подсистема «опорная поверхность – каток» рассматривается в следующих системах декартовых координат:

- $X_0 Y_0 Z_0$ – инерциальная система координат, связана с опорной поверхностью;

- $X_1 Y_1 Z_1$ – локальная система координат, связана с блоком передних неповоротных вибровальцов;

- $X_2 Y_2 Z_2$ – локальная система координат связана с задним поворотным вальцом.

Точка начала отсчета O_1 находится в центре масс первого звена. Ось O_1X_1 направлена по направлению движения катка. Точка O_2 начала отсчета системы координат $X_2 Y_2 Z_2$ находится в точке пересечения осей вращения поворотного вальца и осью поворота. Ось O_2X_2 направлена по направлению движения катка, ось O_2Z_2 направлена вертикально вверх и совпадает с осью поворота вальца, ось O_2Y_2 совпадает с осью вращения вальца и дополняет их до правой триады.

Ведущие вальцы приводятся в движение крутящими моментами $M_{Д1}$ и $M_{Д2}$. Поворотный ведомый валец создает момент сопротивления $M_{С1}$.

Реакция опорной поверхности представлена в виде двух составляющих вертикальной $R_{1В}$ и горизонтальной $R_{1Г}$. Вертикальная реакция $R_{1В}$, обусловлена действием силы тяжести $G_{1,1}$ и силой F_1 , создаваемой вибровозбудителем, вертикальная реакция $R_{2В}$, обусловлена действующей силой тяжести $G_{1,2}$. Вертикальная реакция $R_{3В}$ равна вертикальной нагрузке, создаваемой силой тяжести G_2 . Величину вертикальных реакций можно определить на основании уравнений, представленных в п.3.4 «Математическая модель рабочей среды».

Горизонтальные составляющие реакции $R_{1Г}$ и $R_{2Г}$ возникают в результате действия моментов движущих сил $M_{Д1}$ и $M_{Д2}$, а горизонтальная составляющая реакции $R_{3Г}$ возникает в результате действия момента сопротивления перекачиванию ведомого вальца $M_{С1}$.

Необходимым условием, обеспечивающим трогание катка с места и движение в наиболее тяжелых условиях, которыми являются движение с транспортной скоростью или укатка рыхлого щебня с предельным подъемом,

является то, что сила тяги машины P_T должна быть больше либо равна сумме всех сопротивлений, возникающих при движении катка P_W , т.е. $P_T \geq P_W$ [69, 91, 95, 99].

Сила сопротивления движению катка может быть определена как сумма сил

$$P_W = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}, \quad (3.1)$$

где P_{W1} – сопротивление вызванное силами инерции, которое можно интерпретировать как силу сопротивления разгону; P_{W2} – сопротивление перекачиванию катка по дороге, с учетом преодоления уклонов; P_{W3} – сопротивления, возникающие при движении на криволинейных участках.

Сопротивление от сил инерции может быть определено по формуле [4]

$$P_{W1} = (m_1 + m_2) \frac{v}{t_p} \varepsilon, \quad (3.2)$$

где (m_1+m_2) – масса машины; v – скорость движения, м/с; t_p – время разгона, $t_p=2,0\dots2,5$ с; ε – коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся масс трансмиссии, двигателя, вальцов, $\varepsilon = 1,1\dots1,15$.

Сопротивление перекачиванию по дороге можно определить по формуле [4]

$$P_{W2} = G (k_{СП} + k_y), \quad (3.3)$$

где G – сила тяжести катка; $k_{СП}$ – коэффициент сопротивления перекачиванию, который зависит от вида уплотняемого материала; k_y – уклон, принимаемый в пределах $0,05\dots0,08$.

P_{W3} – сопротивления, возникающие при движении на криволинейных участках, определяется по формуле [4]

$$P_{W3} = k_C G_3, \quad (3.4)$$

где G_3 – сила тяжести поворотного вальца; k_C – коэффициент сопротивления.

Сила тяги P_T может быть определена по формуле

$$P_T = N \cdot \eta / v, \quad (3.5)$$

где N – мощность двигателя катка; η – КПД трансмиссии от двигателя к ведущим вальцам.

Таким образом, варьируя параметры уплотняемого материала, величину уклонов и радиусы кривизны, используя формулы 3.1 – 3.5 можно получить значения скорости и ускорения катка в любой момент времени.

3.2 Математическая модель поворота дорожного катка

Специфика дорожного строительства, обусловленная требованиями нормативной, проектной, технологической документации устанавливают необходимость маневренности дорожных катков, что обеспечивается установленными радиусами поворота машины.

При криволинейном движении мобильных машин можно выделить два режима поворота: с большими радиусами и высокими скоростями движения – он характеризует управляемость, и с малыми радиусами и небольшими скоростями – он характеризует маневренность. Первый режим характерен для строительных и коммунальных машин, созданных на базе грузовых автомобилей. Для дорожных катков целесообразно рассматривать только второй режим поворота.

При составлении математической модели поворота катка были приняты следующие допущения:

1. В виду малой рабочей скорости движения (менее 1 м/с) [38], режим характеризуется отсутствием центробежной силы, отсутствием или крайне незначительным боковым ускорением. Такой процесс можно рассматривать как статический.
2. Вальцы машины недеформируемые, абсолютно жесткие. Таким образом, отсутствуют боковые уводы опорных поверхностей вальцов.
3. Люфты в шарнирах отсутствуют.
4. Элементы конструкции представлены, как абсолютно жесткие тела.
5. Система голономна и стационарна.

Расчетная схема поворота катка представлена на рисунке 3.2.

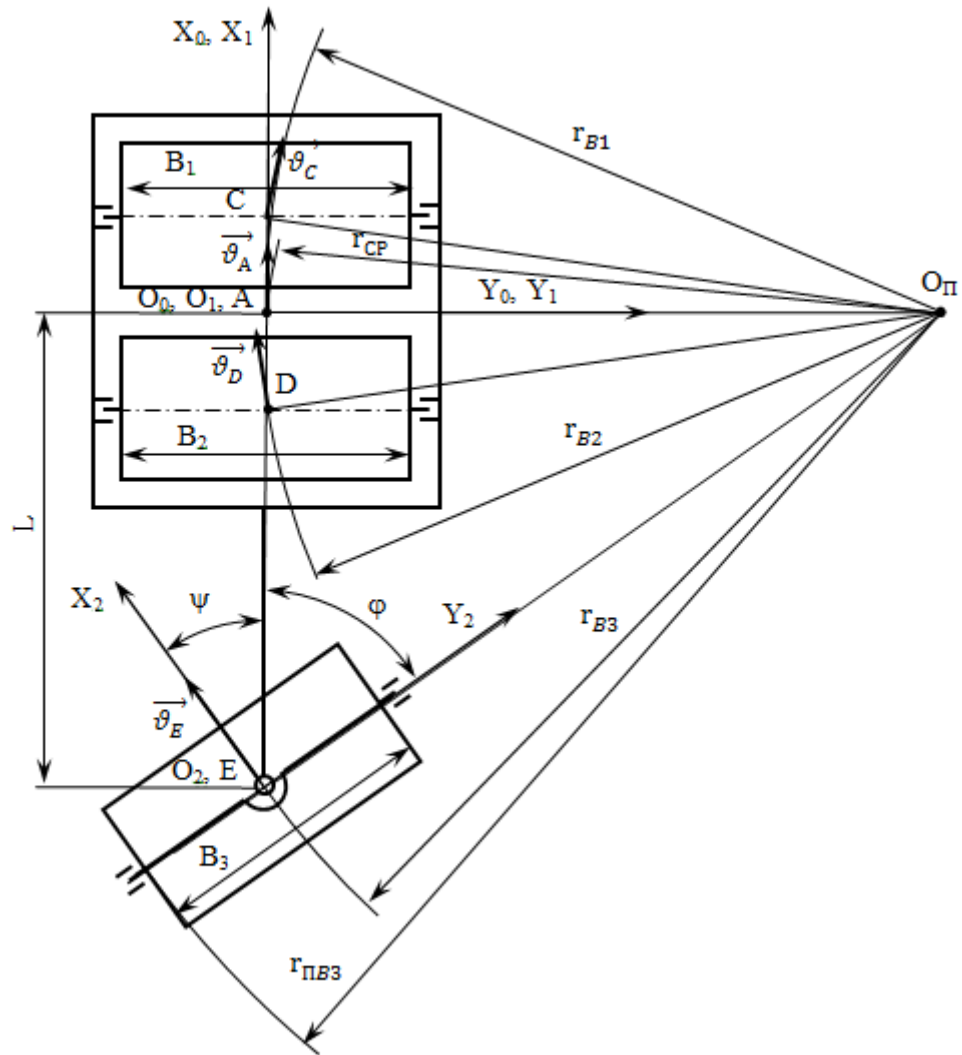


Рисунок 3.2 – Расчетная схема поворота катка

Криволинейное движение дорожного катка как механической системы может быть определено траекторией движения центра масс первого звена, точки А.

Перемещение центра масс представлено в декартовой системе координат в плоскости $O_0X_0Y_0$. Система $O_0X_0Y_0$ является инерциальной системой координат. Положение валцов машины определяют локальные системы координат $O_1X_1Y_1$ и $O_2X_2Y_2$. Система координат $O_1X_1Y_1$ связана с вибрационными неповоротными валцами. Точка начала отсчета O_1 находится в центре масс и в состоянии покоя совпадает с началом инерциальной системы координат $O_0X_0Y_0$ точкой O_0 . Ось O_1X_1 совпадает с продольной осью катка и направлена в сторону движения катка. Ось O_1Y_1 параллельна осям валцов и направлена вправо от оси O_1X_1 .

Центр масс второго звена расположен в точке O_2 и совпадает с вертикальной осью вращения поворотного вальца. Ось O_2X_2 в состоянии покоя (в исходном положении) проходит через точку O_1 . Ось O_2Y_2 параллельна оси вальца и направлена вправо от оси O_2X_2 . Величина поворота поворотного вальца определяется углом ψ , углом между осями O_1X_1 и O_2X_2 .

При повороте катка векторы скоростей центров всех осей катка $\vec{v}_A, \vec{v}_C, \vec{v}_D$ и \vec{v}_E перпендикулярны радиусам, проведенным из центра поворота, точки O_{II} .

При осуществлении поворота, неизбежно скольжение неуправляемых вальцов, промежуточного в направлении от центра поворота, направляющего – к центру.

В виду того, что направление скоростей \vec{v}_C и \vec{v}_D обратно пропорционально друг другу их уравнивание происходит в точке А являющейся центром межосевого интервала неуправляемых вальцов машины.

Направление скорости точки А будет совпадать с направлением продольной оси машины O_1X_1 и будет равна

$$v_A = (v_C + v_D)/2 . \quad (3.6)$$

Точка O_{II} пересечения перпендикуляров к направлениям скоростей точек середин продольных осей вальцов катка \vec{v}_A , и \vec{v}_E является мгновенным центром поворота [11, 54].

Особенностью поворота трехосного катка с расстановкой по базе два передних неповоротных вальца и один поворотный задний валец будет являться расположение O_{II} на продолжении оси, перпендикулярной центру межосевого интервала неповоротных вальцов на продольной оси машины.

Центр масс первого звена, точка O_1 будет двигаться по окружности радиусом r_{CP} , точка O_2 по окружности радиусом r_{B3} . Радиусы поворота первого и второго неповоротного вальцов обозначим как r_{B1} и r_{B2} соответственно.

Исходя из геометрических соотношений, можно найти зависимости радиусов кривизны траектории описываемых серединами продольных осей вальцов машины.

Средний радиус поворота неповоротных вальцов будет равен

$$r_{CP} = L \operatorname{ctg} \psi, \quad (3.7)$$

где L – расстояние между точками O_1 и O_2 .

Поскольку $\psi = 90^\circ - \varphi$, то средний радиус поворота может быть найден как

$$r_{CP} = L \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.8)$$

где φ – угол поворота оси O_2X_2 относительно оси O_1X_1 .

Радиус поворота поворотного вальца r_{B3} будет равен

$$r_{B3} = L / \cos \varphi = L / \sin \psi \quad (3.9)$$

Максимальный радиус смещения поворотного вальца будет равен

$$r_{ПВ3} = r_{B3} + 0,5 B_3, \quad (3.10)$$

где B_3 – ширина поворотного вальца.

Подставим выражение (3.9) в формулу (3.10) и получим

$$r_{ПВ3} = \frac{L}{\cos \varphi} + 0,5 B_3 = \frac{L}{\sin \psi} + 0,5 B_3. \quad (3.11)$$

Траектории движения точек C и D , лежащих на осях неповоротных вальцов, могут быть определены по теореме Пифагора

$$r_{B1} = \sqrt{(AC^2 + (L \cdot \operatorname{ctg} \psi)^2)}, \quad (3.12)$$

$$r_{B2} = \sqrt{(AD^2 + (L \cdot \operatorname{ctg} \psi)^2)}. \quad (3.13)$$

Угол поворота поворотного вальца зависит от угла поворота руля и может быть определен как

$$\varphi_{PK} = \frac{\psi}{U_{PK}}, \quad (3.14)$$

где U_{PK} – передаточное отношение рулевого механизма 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.

3.3 Модель системы управления дорожного катка

Определяя роботизированную систему управления, как набор функций логического управления и силовых функций, позволяющих проводить мониторинг, управление механической конструкцией робота, и осуществлять связь с оборудованием, ее математическую модель необходимо рассматривать, как алгоритм работы системы. Задача алгоритма обеспечить управление силовой установкой, органами управления катка для реализации движения строительной дорожной машины по расчетной траектории с заданной скоростью и выполнение машиной необходимых технологических операций.

Математическая модель роботизированной системы управления, представленная в данной работе, выполнена в виде блок-схемы и описывает работу системы управления при выполнении машиной технологической операции по уплотнению дорожного основания (покрытия) заданного участка.

Координаты движения машины на различных этапах выполнения операции систематизированы по группам: начальные, текущие, промежуточные, конечные - рисунок 3.3.

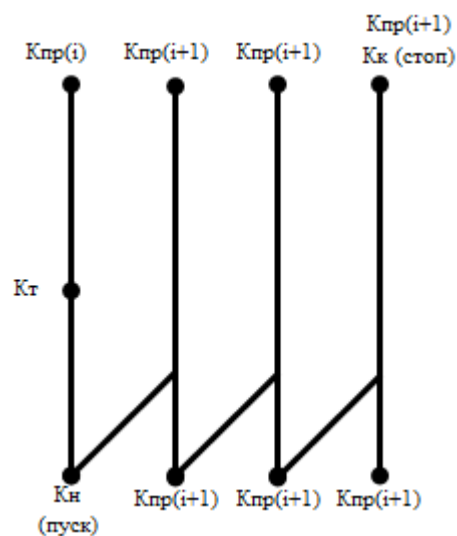


Рисунок 3.3 – Координаты движения машины на различных этапах выполнения операции: Кн – координата начальная (начало движения); Кт – координата текущая; Кпр – координата промежуточная; Кк – координата конечная (стоп)

Работа алгоритма представлена на рисунках 3.4.1 – 3.4.4

На рисунке 3.4.1 описан начальный этап работы системы:

- Ввод исходных данных: текущие координаты (x_t, y_t), текущая скорость (V_t), положение органов управления, расчетная траектория - координаты траектории движения ($x_{[i+1]}, y_{[i+1]}$), расчетная скорость во время движения (V_p), координаты конечные, промежуточные ($x_{пр}, y_{пр}, x_{к}, y_{к}$) и др.;
- расчет эксплуатационных параметров – скорости поворота поворотного вальца φ , рабочей скорости машины V , управляющих воздействий - $\Delta\varphi, \Delta V$ на органы управления;
- Алгоритм запуска двигателя, выключения тормоза, установки рабочих оборотов ДВС на основании руководства по эксплуатации ДУ-107;
- Алгоритм принятия решения, исполнительная команда и передача управляющего сигнала на электропривод рычага реверса (вперед – назад).

На рисунке 3.4.2 представлено продолжение алгоритма работы системы, где описан этап работы при движении машины по заданному маршруту:

- ввод текущих данных – текущей скорости машины V_t , текущих координат x_t, y_t ;
- анализ данных текущих координат и скорости машины, их соответствие расчетным;
- расчет и передача управляющих сигналов $\Delta\varphi$ на электропривод руля и ΔV на электропривод рукоятки установки оборотов ДВС, с целью корректировки курса и скорости машины при необходимости.

Рисунок 3.4.3 описывает заключительный этап работы системы:

- анализ текущих координат, скорости машины;
- алгоритм выключения реверса (нейтральное положение), включение тормоза, установки холостых оборотов ДВС, в случае прибытия машины в конечную точку маршрута, завершения операции;
- вывод системы о соответствии расчетным значениям скорости машины, координат, положений органов управления.

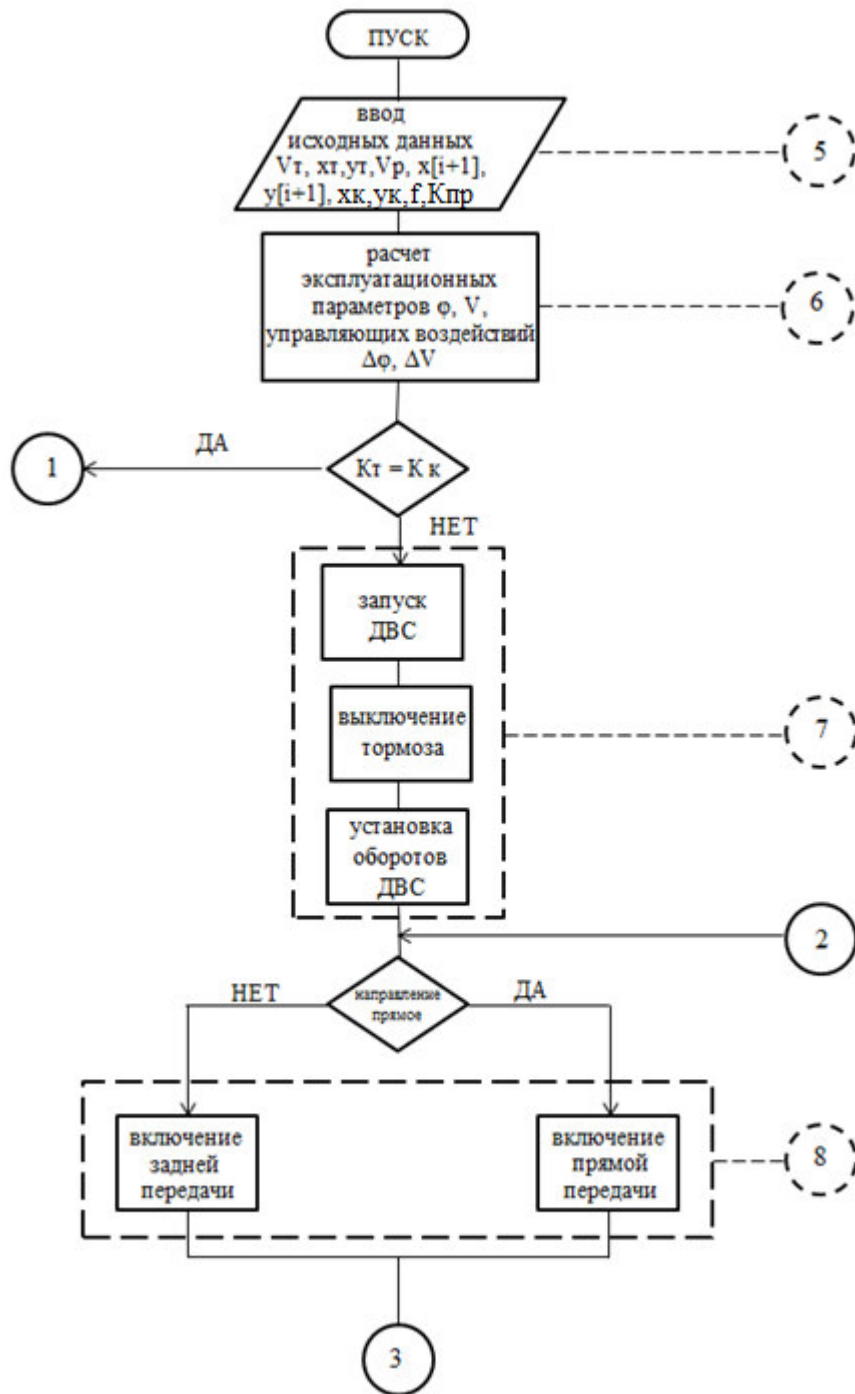


Рисунок 3.4.1 – Алгоритм работы системы управления дорожного катка (часть 1)

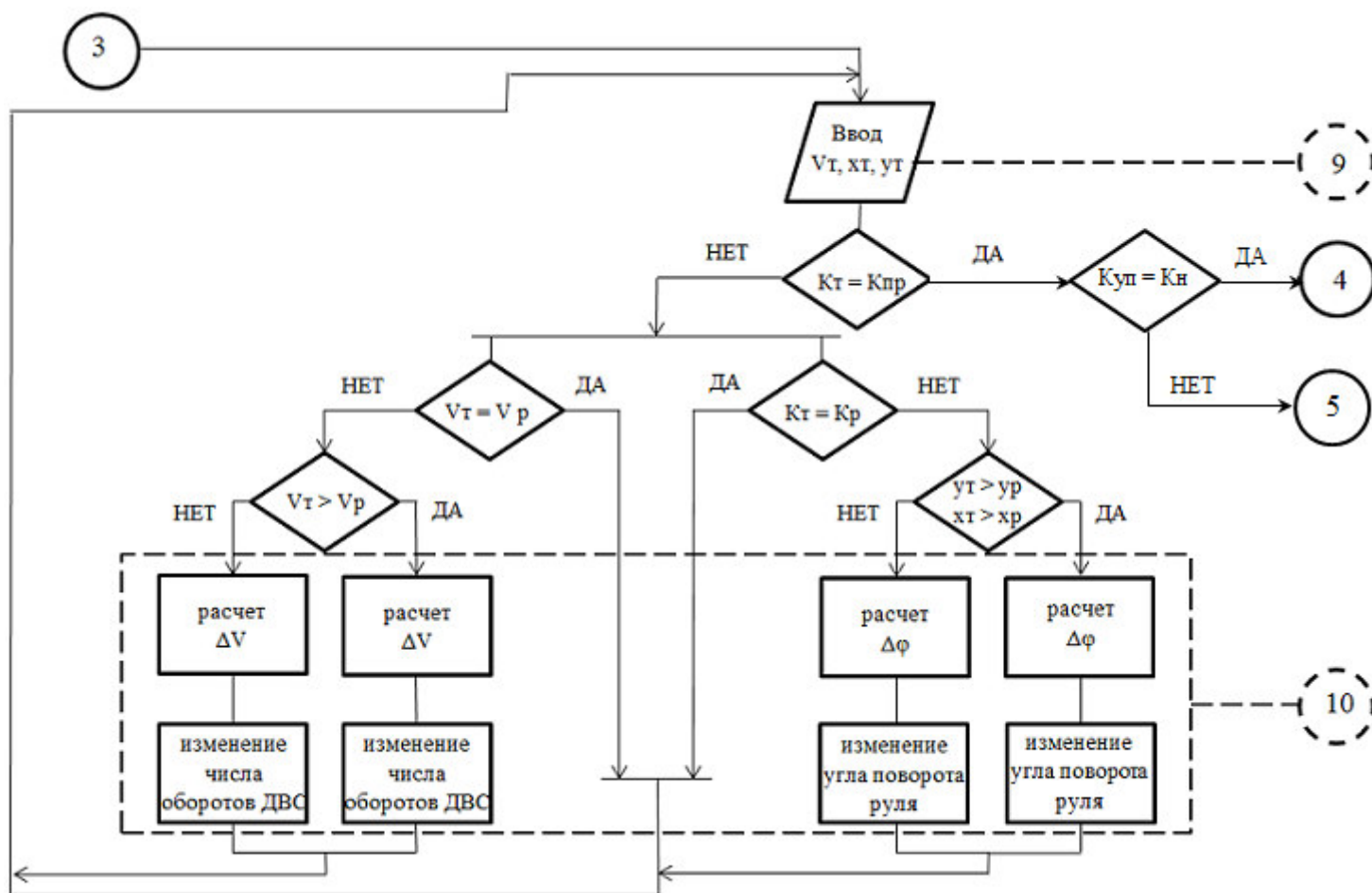


Рисунок 3.4.2 - Алгоритм работы системы управления дорожным катком (часть 2)

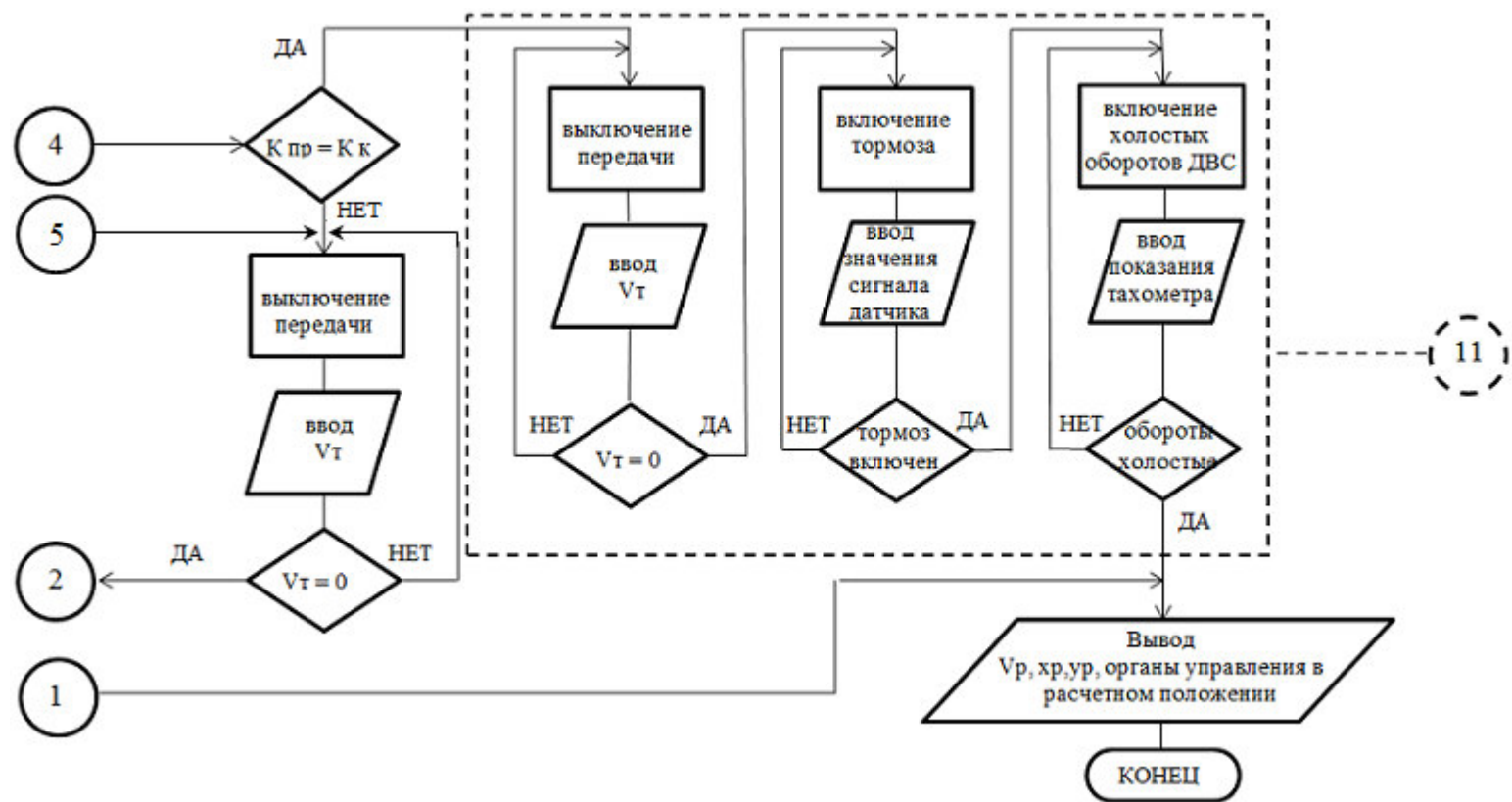


Рисунок 3.4.3 - Алгоритм работы системы управления дорожного катка (часть 3)

На рисунке 3.4.4 представлены комментарии к элементам алгоритма.

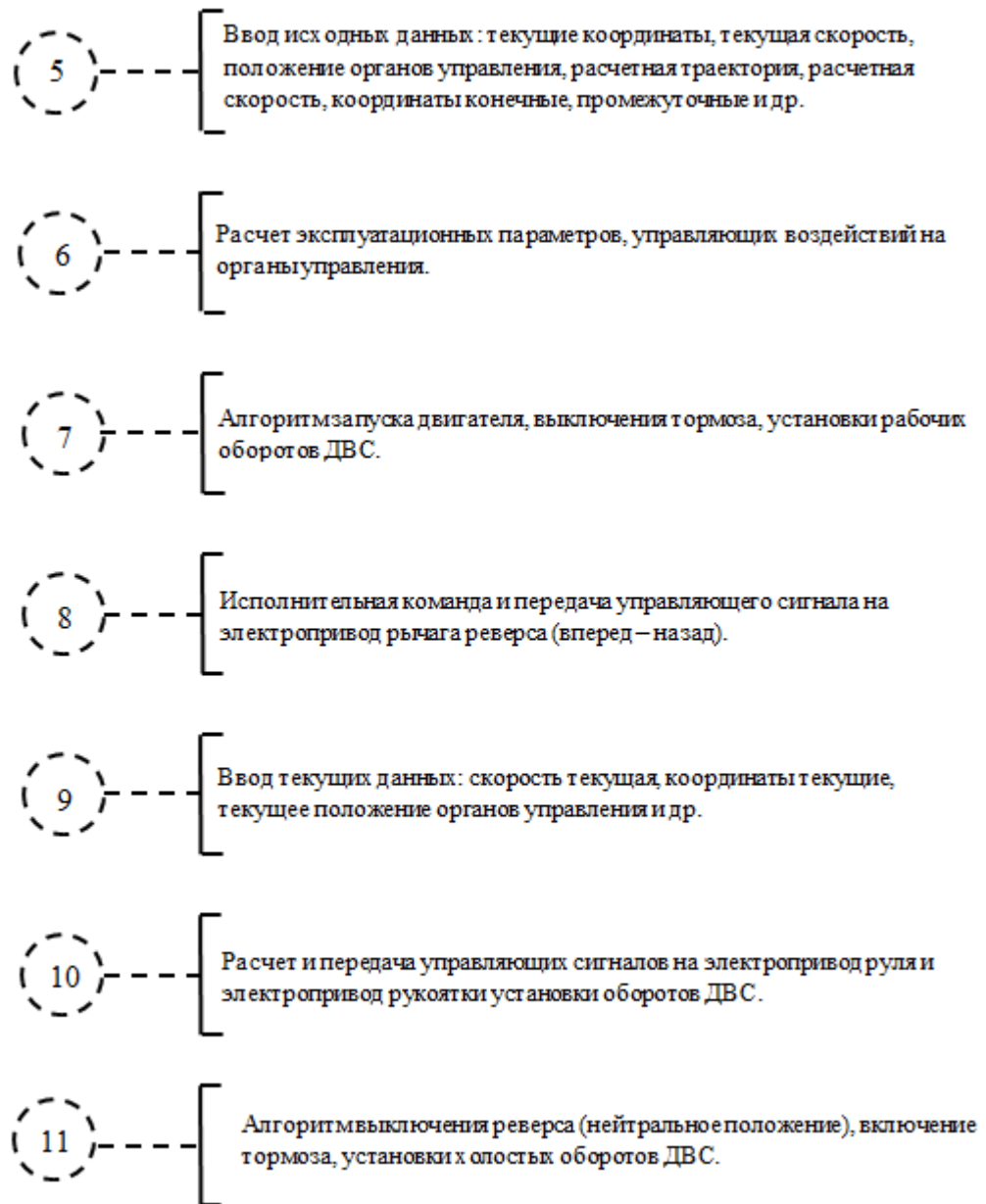


Рисунок 3.4.4 – Комментарии к элементам алгоритма

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.

3.4 Математическая модель рабочей среды

Математическую модель рабочей среды дорожного катка (уплотняемого материала) можно выразить получающимся из принципа наименьшего действия уравнением Эйлера-Лагранжа [52] для одномерного движения материальной точки, моделирующей сосредоточенную массу активной области.

В подходе, описанном в [39], реализованы, как диссипативные силы вязкого трения, возникающие при движении грунта, так и силы сухого трения [60].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial T}{\partial z} = F(z, \dot{z}, t) + F_{\text{тр}}, \quad (3.15)$$

где $T(z, \dot{z}) = \frac{m(z)\dot{z}^2}{2}$ – кинетическая энергия активной области грунта, $F(z, \dot{z}, t)$ – силы действующие на грунт: внешние – обусловленные динамическим нагружением от рабочего органа; внутренние – силы упругости и вязкого трения, выделенная отдельно $F_{\text{тр}}$ – сила трения, моделирующая элемент пластичности, включающийся при превышении контактным напряжением величины, определяемым пределом текучести грунта [60].

Схематически модели активной области уплотняемого слоя при взаимодействии с вальцом дорожного катка представлена на рисунке 3.5.

Упругая сила сопротивления упруговязкопластичного материала, при поверхностном нагружении вальцом дорожного катка, является, в общем случае, нелинейной по деформации. Что выражается зависящей от величины смещения жесткостью уплотняемого материала [60].

$$F_{\text{упр}} = c(z)z, \quad (3.16)$$

Дальнейшее моделирование упругих свойств уплотняемого материала требует учета следующих фактов:

1) Сила сопротивления нагружению при убывании напряжений (разгрузке), зависит только от упругой составляющей модуля деформации, а при нагружении от модуля полной деформации.

2) После снятия деформирующего воздействия, уплотняемый слой не подвергается отрицательным деформациям (не испытывает растяжения) [60].

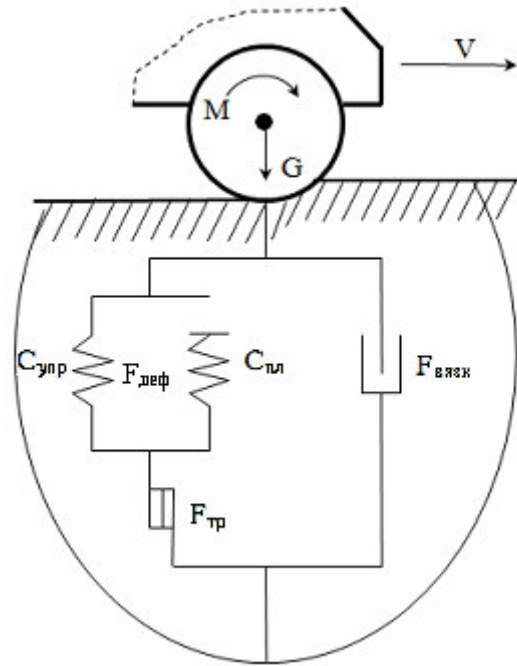


Рисунок 3.5 - Схематичное представление модели активной области уплотняемого слоя при взаимодействии с вальцом дорожного катка

Учитывая данные факторы, для описания упругих свойств уплотняемого материала, введем следующие соотношения [60]

$$\sigma_{\text{деф}} = E\varepsilon, E = (E_{\text{пл}}\theta(\dot{\sigma}) + E_{\text{уд}})\theta(\sigma_{\text{пл}}), \quad (3.17)$$

где $E_{\text{пл}}$ – модуль пластической деформации среды слоя, $E_{\text{уд}}$ – модуль упругой деформации среды слоя, $\dot{\sigma}$ – скорость нарастания напряжений, описывающая нагружение, $\theta(z) - \theta$ – функция Хевисайда, $\sigma_{\text{пл}}$ – предел пластичности среды слоя.

Переходя к силе сопротивления и жесткостям для пластической и упругой деформации, получим выражения [60]

$$F_{\text{деф}} = c(z)z, c(z) = (c_{\text{пл}}(z)\theta(\dot{\sigma}) + c_{\text{упр}}(z))\theta(\sigma_{\text{пл}}), \quad (3.18)$$

где $c_{\text{пл}}$, $c_{\text{упр}}$ – жесткость пластической и упругой деформации.

Вязкое сопротивление активной области уплотняемого материала, моделируемое элементом вязкого трения, выражается соотношением [60]

$$\sigma_{\text{вязк}} = \mu\dot{\varepsilon}, \quad (3.19)$$

из которого следует выражение для сосредоточенной вязкости [60]

$$F_{\text{вязк}} = b(z)\dot{z}. \quad (3.20)$$

При превышении контактным напряжением значения предела текучести, соответствующего состоянию упруговязкопластичной среды уплотняемого слоя в текущий момент

$$\sigma(t) \geq \sigma_{\text{пл}}, \quad (3.21)$$

где $\sigma(t)$ – текущее значение контактного давления, пластическое деформирование будет происходить без восстановления.

Для области уплотняемого слоя, в котором выполняется данное условие, сила сопротивления сухого трения выражается [60]

$$F_{\text{тр}}(t) = S_{\text{cont}}(t)\sigma_{\text{пл}}, \quad (3.22)$$

где $S_{\text{cont}}(t)$ – площадь пятна контакта вальца и поверхности уплотняемого слоя.

Таким образом, рассмотрены и учтены основные силы, возникающие в уплотняемом материале, при взаимодействии с рабочим органом дорожного катка, оказывающие влияние на модель дорожного катка и являющиеся элементами сложной динамической системы «Роботизированная СУ», «СДМ», «рабочая среда».

Выводы по главе

1. 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.

2. Математическая модель рабочей среды учитывает и описывает основные силы, возникающие в уплотняемом материале при взаимодействии с

рабочими органами катка – вальцами и оказывающими влияние на машину, параметры ее движения, отраженные в модели.

3. Математическая модель дорожного катка рассмотрена в виде двух моделей описывающих динамические свойства и особенности машины – математическая модель катка, позволяющая производить расчеты скорости, ускорения машины при движении по уплотняемой поверхности – модель поворота катка, позволяющая производить расчеты траектории движения машины по ее основным характерным точкам.

4. Модель системы управления, представленная в виде алгоритма работы системы, учитывая конструктивные и эксплуатационные параметры машины, 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.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Теоретические исследования катка проводились с использованием математической модели, представленной в главе 3. В ходе исследований проводилось изучение влияния технических характеристик, конструктивных и эксплуатационных параметров машины, на траекторию движения, точность позиционирования. Указанные параметры и характеристики определяют способность катка выполнять с заданной точностью технологические задачи по уплотнению дорожных покрытий и оснований.

В ходе проведения исследований решались следующие задачи:

- обосновать параметры характеризующие маневренность катка;
- определить конструктивные и эксплуатационные параметры катка, влияющие на маневренность и точность позиционирования;
- получить зависимости между конструктивными и технологическими параметрами катки и параметрами, характеризующими его маневренность;
- выработать рекомендации по выбору значений конструктивных и технологических параметров катка, его системы управления, необходимых для создания роботизированного дорожного катка.

4.1. Обоснование параметров характеризующих маневренность дорожного катка

Проведенный анализ работ выполняемых дорожными катками при уплотнении дорожных оснований и покрытий позволил определить основные виды маневров выполняемых машиной. К ним относятся:

- прямолинейное движение (прямой и обратный ход);
- перестроение на параллельный курс при переходе с одной уплотняемой полосы на другую (прямой и обратный ход);
- разворот катка.

Прямолинейное движение катка происходит при неизменном положении рулевого механизма. Основная задача при осуществлении прямолинейного движения сводится к контролю величины отклонения от прямолинейного движения на допускаемую величину (погрешность). В случае выхода за допустимую погрешность движения по курсу будет осуществляться маневр, алгоритм которого соответствует алгоритму управления при параллельном перестроении машины. В связи с этим наибольший интерес для разработки системы управления курсом представляет собой изучение основных параметров машины, системы управления оказывающих существенное влияние на перестроение машины на параллельный курс и разворот.

В качестве примера на рисунке 4.1 показана траектория движения катка при уплотнении участка дорожного полотна. На рисунке показаны траектории движения переднего и заднего вальца при перестроении на параллельную полосу уплотнения.

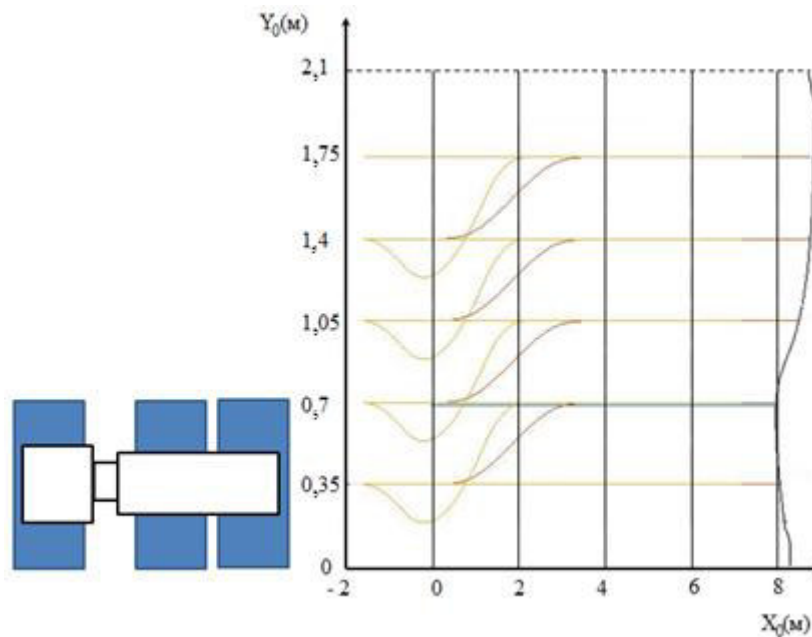


Рисунок 4.1 – Траектория движения ДУ-107 при уплотнении участка

На рисунке 4.2 представлен пример траектории движения заднего и переднего вальца при левом развороте катка ДУ-107.

Как видно из представленных рисунков при криволинейном движении задний валец движется по большему радиусу, по сравнению с передним вальцом. Происходит **смещение** заднего вальца относительно переднего.

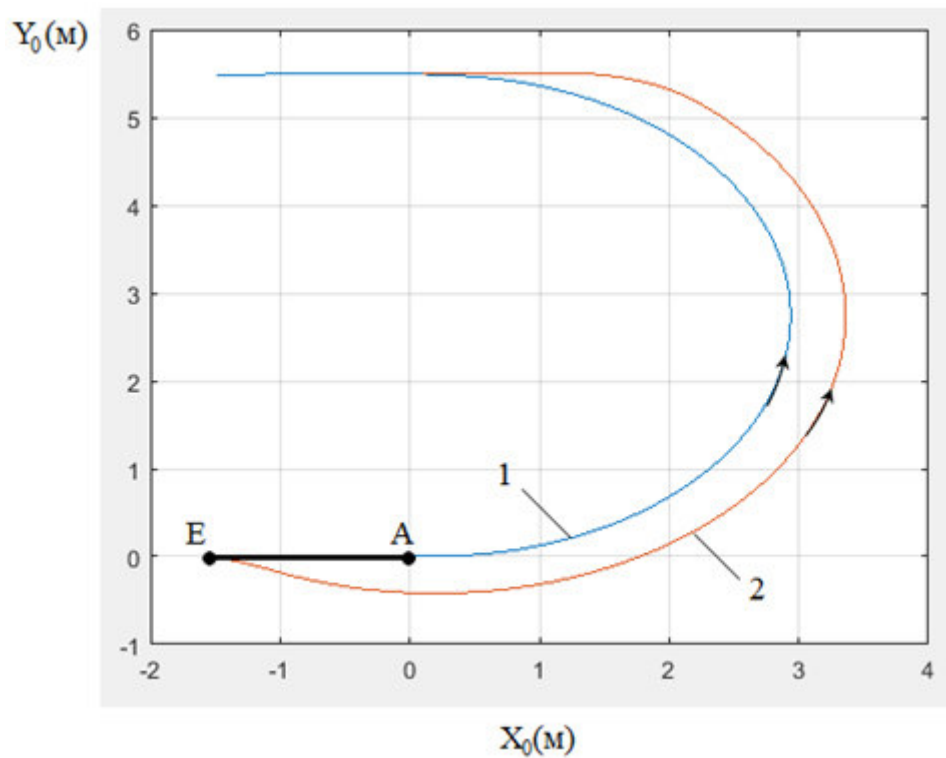


Рисунок 4.2 – Траектория движения заднего и переднего вальца при развороте:

1 – траектория переднего вальца; 2 – траектория заднего вальца

На основании анализа траекторий движения заднего и переднего валцов были выделены основные параметры, характеризующие маневренность роботизированного катка. К ним относятся:

1. Дистанция перестроения на параллельный курс $x_{\text{дн}}$ (м).
2. Интервал перестроения на параллельный курс $y_{\text{ин}}$ (м).
3. **Смещение** поворотного вальца при перестроении Δy_n (м).
4. Дистанция разворота $x_{\text{др}}$ (м).
5. Интервал при развороте $y_{\text{ур}}$ (м).
6. **Смещение** поворотного вальца при развороте Δx_p и Δy_p (м) .

За дистанцию перестроения $x_{\text{дн}}$ (рисунок 4.3) примем конечное значение координаты x точки A базы машины AE при завершении маневра перестроения

(поворотный валец принимает первоначальное положение $\varphi = 90^\circ$, движение прямолинейное).

За интервал перестроения y_{un} примем заданное (полученное) смещение машины по оси O_0Y_0 (см. рисунок 4.3).

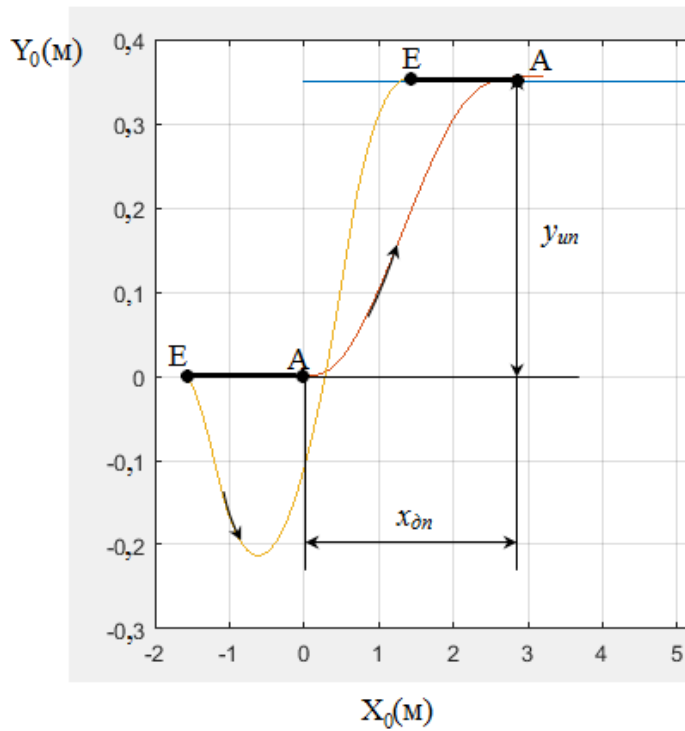


Рисунок 4.3 – Дистанция $x_{\delta n}$ и интервал y_{un} при параллельном перестроении с одной полосы уплотнения на смежную

За дистанцию разворота $x_{\delta p}$ (рисунок 4.4) примем максимальное значение координаты x точки A базы AE при развороте машины на параллельный обратный курс по оси O_0X_0 .

За интервал разворота y_{up} примем полученное при вороте катка расстояние по оси O_0Y_0 (см. рисунок 4.4)

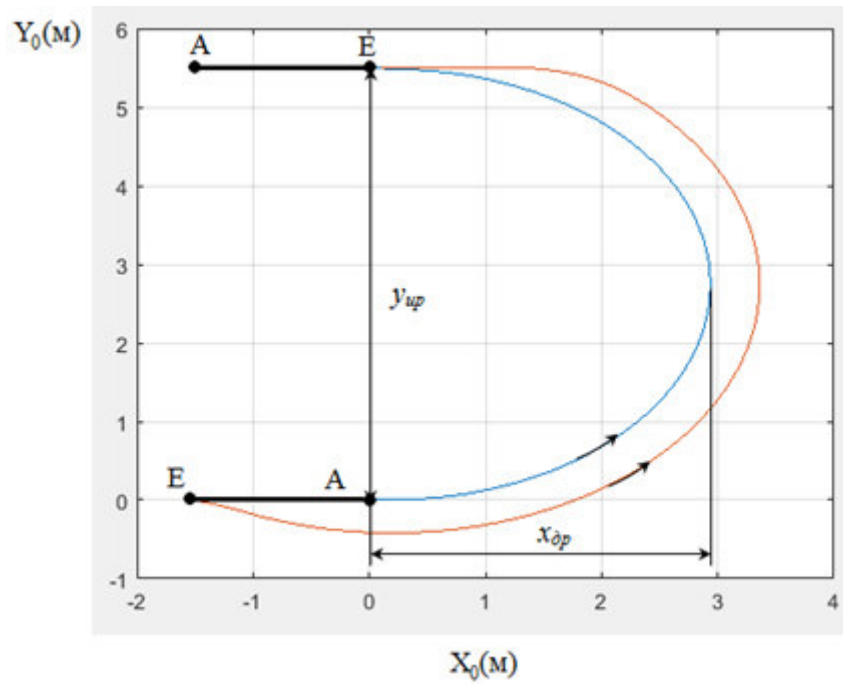


Рисунок 4.4 – Дистанция x_{dp} и интервал y_{up} при развороте катка на обратный курс.
1 – траектория переднего вальца; 2 – траектория заднего вальца

За величину смещения поворотного вальца при перестроении Δy_n (рисунок 4.5) примем максимальное смещение точки E базы машины AE по оси O_0Y_0 .

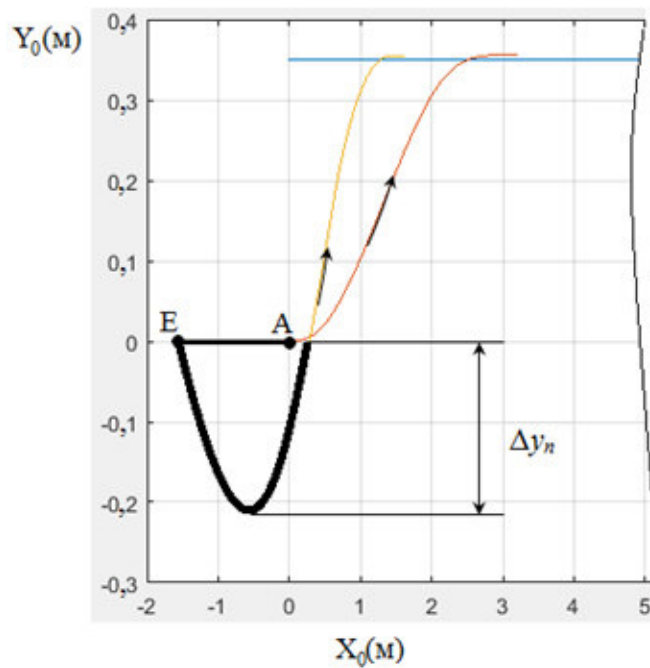


Рисунок 4.5 – Смещение поворотного вальца при параллельном перестроении (Δy_n)
1 – траектория переднего вальца; 2 – траектория заднего вальца

За величину смещения поворотного вальца при развороте Δx_p и Δy_p (рисунок 4.6) примем разницу максимальных значений координат по осям O_0X_0 и O_0Y_0 точек A и E базы машины AE .

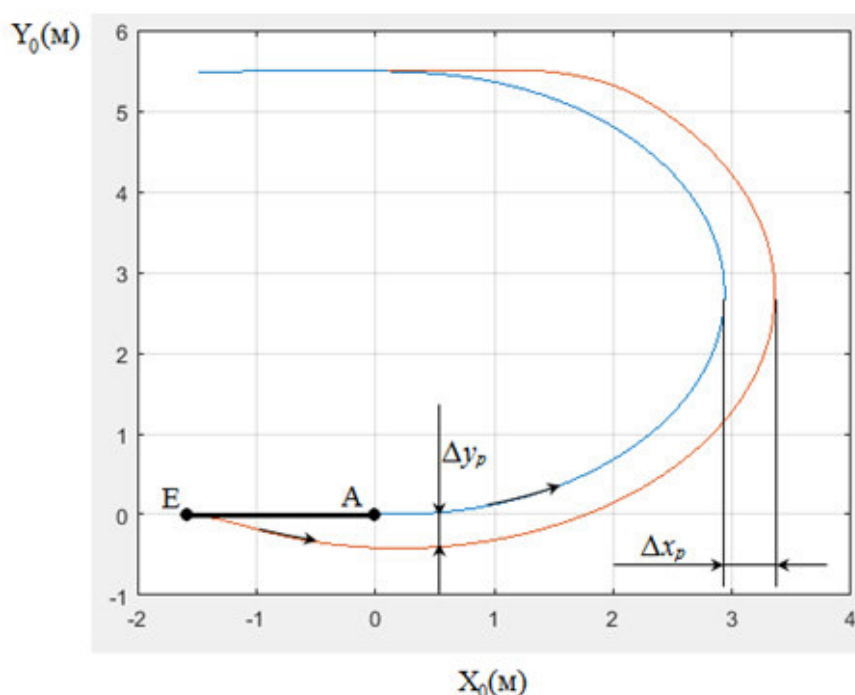


Рисунок 4.6 – Смещение поворотного вальца при развороте на обратный параллельный курс
1 – траектория переднего вальца; 2 – траектория заднего вальца

Точность позиционирования катка может быть определена величиной смещения Δx и Δy фактической точки позиционирования относительно расчетной по соответствующим осям O_0X_0 и O_0Y_0 .

Осуществление маневра оператор может проводить как при движении катка, так и при трогании его с места. Начальные условия для моделирования данного движения будут отличаться. Для их описание введем следующие понятия:

Расчетный случай 1 – перестроение при движении машины с постоянной рабочей скоростью.

Расчетный случай 2 – перестроение при трогании с места.

Расчетный случай 2 отличается от *расчетного случая 1* тем, что каток осуществляет движение с разгоном со скорости покоя - 0 м/с до рабочей скорости.

Предварительный анализ показал, что наибольшее влияние на параметры, характеризующие маневренность катка оказывают: база катка, скорость поворота поворотного вальца, скорость движения катка, начальные условия (расчетный случай). Для определения степени влияния и получения функциональных зависимостей параметров характеризующих маневренность катка от конструктивных и эксплуатационных параметров необходимо провести теоретические исследования. Для минимизации числа опытов и в тоже время получения полноценной информации был разработан план проведения исследований (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – План проведения теоретических исследований

Номер опыта	Варьируемые параметры				Исследуемые параметры
	Расчетный случай	L	φ'	V	
1	var	const	const	const	$x_{\partial n}, y_{un}, \Delta y_n, x_{\partial p}, y_{up}, \Delta x_p, \Delta y_p$
2	const	var	const	const	$x_{\partial n}, \Delta y_n, x_{\partial p}, y_{up}, \Delta x_p, \Delta y_p$
3	const	const	var	const	$x_{\partial n}, \Delta y_n, x_{\partial p}, y_{up}, \Delta x_p, \Delta y_p$
4	const	const	const	var	$x_{\partial n}, \Delta y_n, x_{\partial p}, y_{up}, \Delta x_p, \Delta y_p$

4.2. Алгоритм работы системы управления при выполнении маневра

Осуществление маневра (поворота, разворота, перестроения) катка и приведение его в заданную точку пространства с необходимой точностью должно осуществляться системой управления по определенному алгоритму. Наиболее сложным из основных видов маневра будет являться процесс перестроения катка на соседнюю полосу уплотнения.

В ходе проведенных исследований было выявлено, что процесс перестроения можно разделить на 4 этапа. На рисунке 4.7 схематично показано положение поворотного вальца, начало каждого этапа отмечено точками t_i .

1 этап. Начало в точке t_1 .

Начальное положение – угол поворота вальца $\varphi = 90^\circ$.

Каток начинает движение. Валец поворачивается вправо, каток поворачивает влево. $\varphi \rightarrow \max (120^\circ)$. Радиус поворота уменьшается $R \rightarrow \min$.

2 этап. Начало в точке t_2 .

Валец поворачивается влево, но каток продолжает поворот влево. $\varphi \rightarrow 90^\circ$, радиус поворота увеличивается $R \rightarrow \max$.

3 этап. Начало в точке t_3 .

угол поворота вальца $\varphi = 90^\circ$.

Валец поворачивается влево. $\varphi \rightarrow \min (60^\circ)$. Машина поворачивает вправо. $R \rightarrow \min$.

4 этап. Начало t_4 . Валец поворачивает вправо. $\varphi \rightarrow 90^\circ$. Машина завершает поворот вправо с $R \rightarrow \max$.

$\varphi = 90^\circ$ - конец перестроения.

При выполнении перестроения на заданный интервал y_{un} по оси ОУ, задачей системы управления является корректировка длительности каждого из четырех этапов перестроения. При достижении точкой А базы катка определенного, расчетного значения У, начинается следующий этап. При этом начало этапов, расположение поворотных точек зависит от таких параметров как скорость катка, V, угла поворота руля, φ' , конструктивных параметров, а так же установленных конечных координат перестроения.

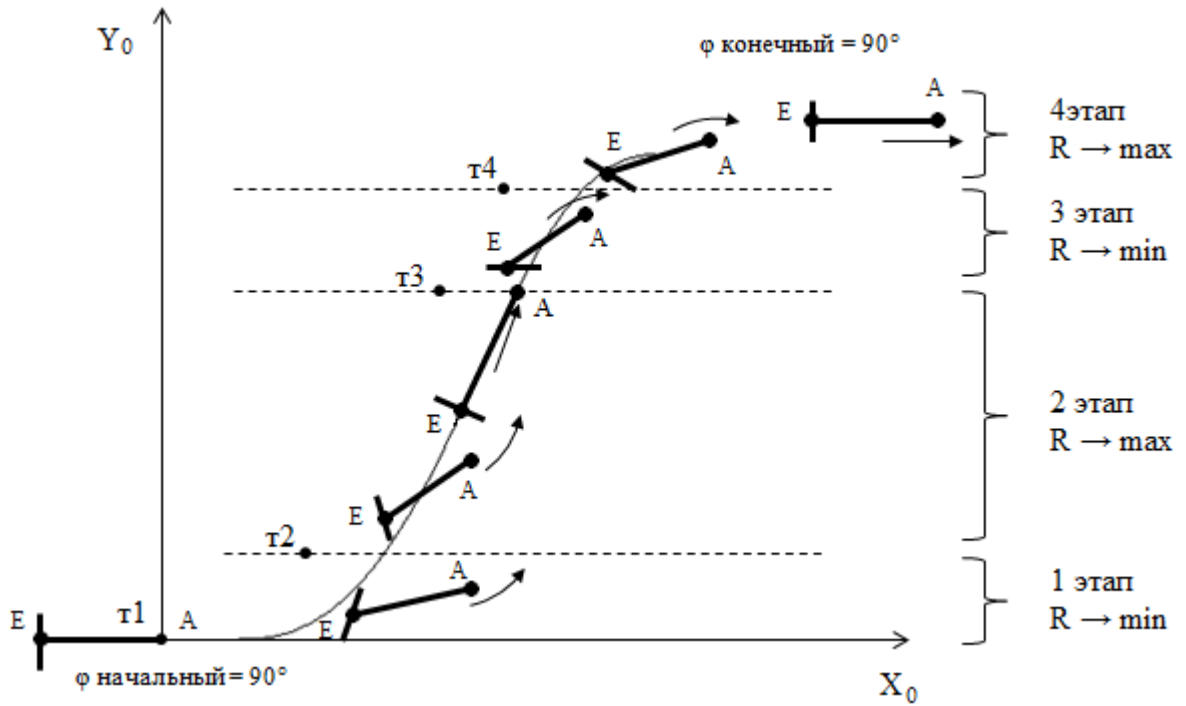


Рисунок 4.7 – Схема перестроения катка

При моделировании работы системы поворота руля использовался закон постоянной скорости (рисунок 4.8). Правомерность использования данного закона была подтверждена в ходе проведения экспериментальных исследований.

В качестве примера на рисунке 4.9 представлены результаты моделирования процесса перестроения катка при: V катка – 2 км/ч, φ' - 15 град/с. Моделировалось перестроение на интервал 0,3 м, 0,35 м, и 0,4 м.

Из полученных зависимостей видно, что для изменения интервала перестроения необходимо изменять длительность каждого этапа перестроения катка. Несоблюдения необходимого соотношения длительности этапов может привести к отклонению от заданной конечной точки перестроения.

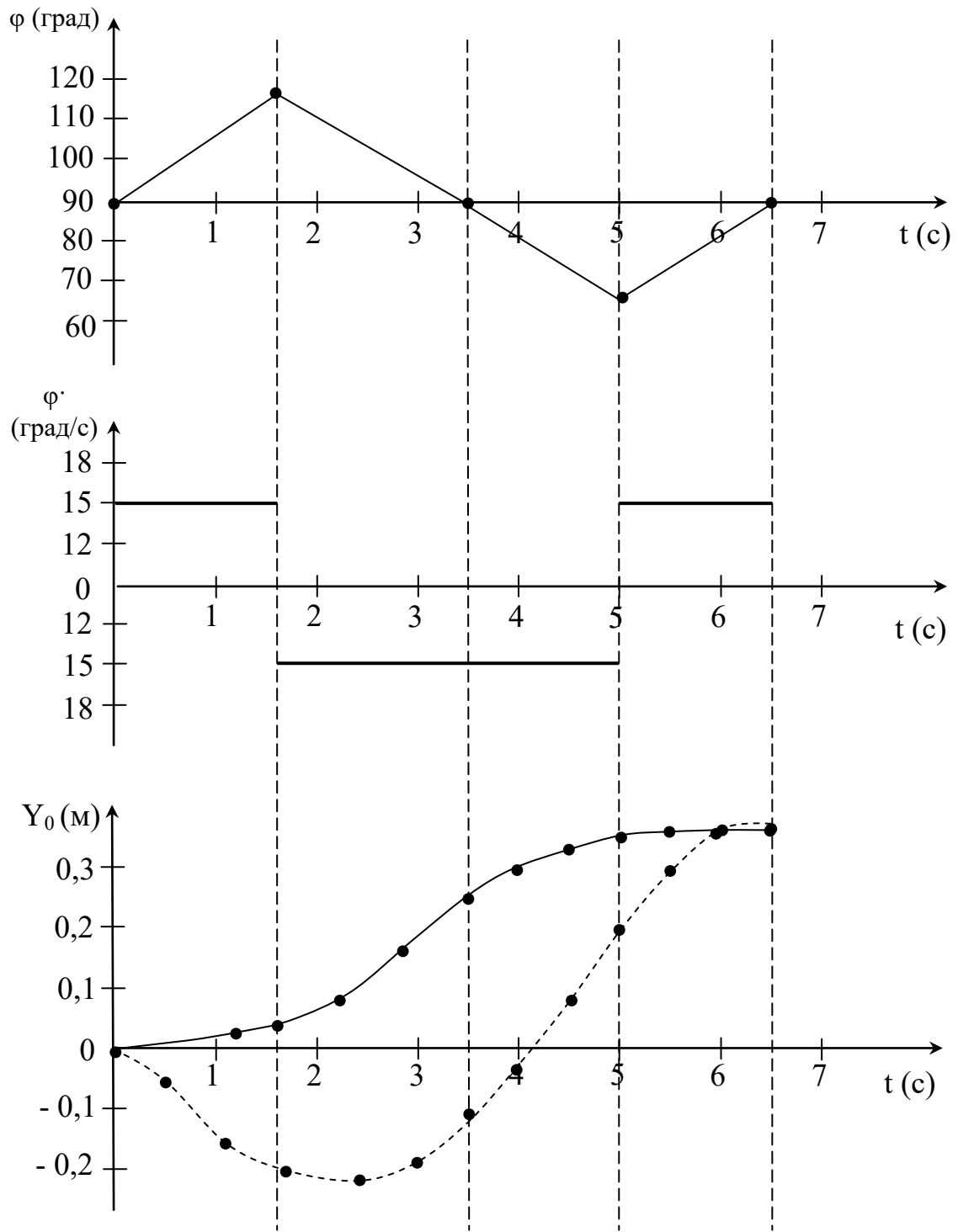


Рисунок 4.8 – Диаграмма угла поворота вальца, скорости поворота вальца и характерных точек катка от времени

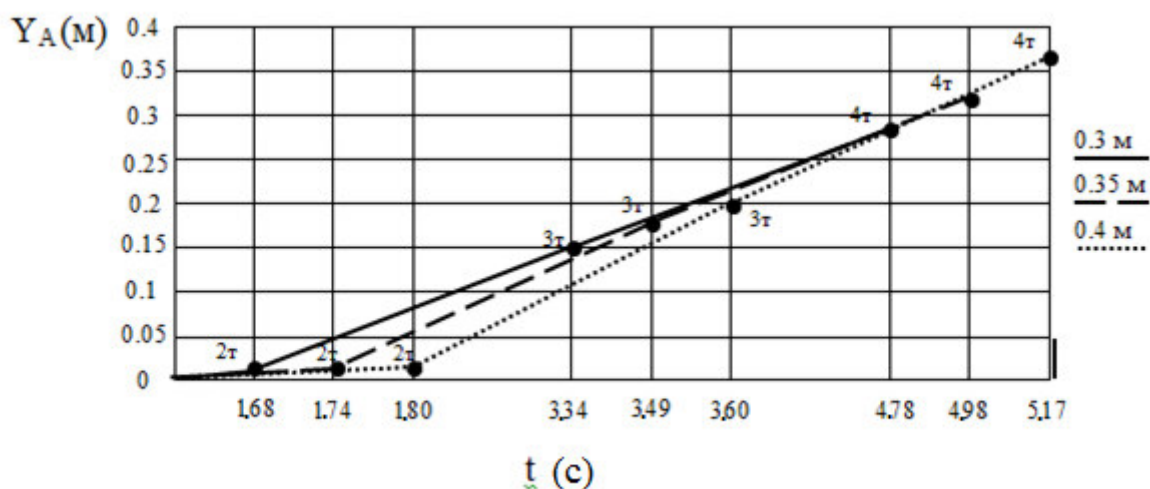


Рисунок 4.9 – Зависимость координаты Y_A от работы алгоритма системы управления при перестроении на 0,3 м, 0,35 м, 0,4 м.

В качестве примера на рисунке 4.10 показана зависимость интервала перестроения от длительности третьего этапа. При моделировании перестроения на 0,35 м, в работу программы управления вносились изменения. Время начала третьего этапа перестроения, точка t_3 смещалась по времени на 10 циклов назад и на 10, 30, 40 циклов вперед, относительно расчетного. Как видно из полученной зависимости смещение точки t_3 от расчетной приводило к смещению y_{un} и, как следствие, выходу машины за пределы допуска при перестроении.

Таким образом, можно сделать вывод, что нарушение длительности циклов работы системы управления, при перестроении оказывает существенное влияние на точность позиционирования катка, качество выполнения поставленной задачи по уплотнению дорожного покрытия. Отсюда следует, что величина интервала перестроения и интервала разворота катка полностью определяются алгоритмом работы системы управления поворотом дорожного катка.

Анализ траектории движения катка при перестроении показал, что рассмотренные четыре этапа перестроения могут быть описаны в виде двух кривых поворота на заданный угол. Получается, что любая произвольная траектория движения катка может быть разбита на прямолинейные участки и радиусы поворота. Наибольший интерес для моделирования представляет

описание поворота на произвольный угол. Схема положения поворотного вальца и поворотные точки представлена на рисунке 4.11.

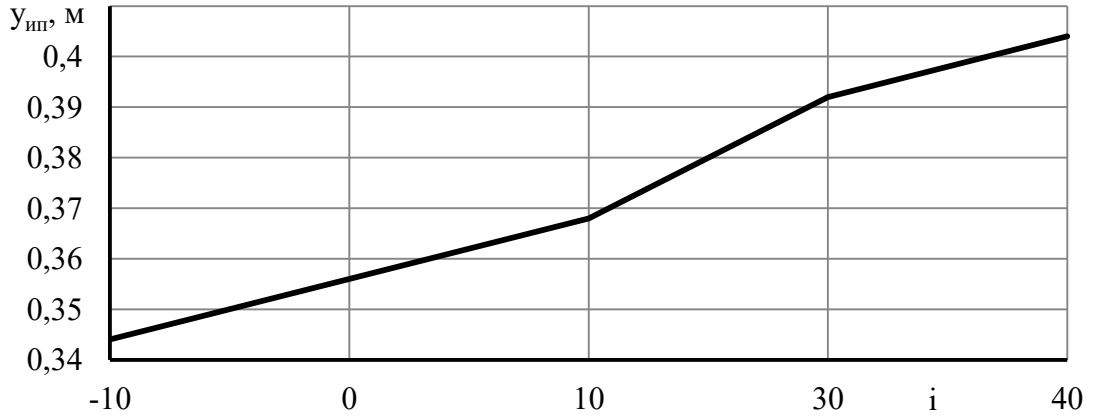


Рисунок 4.10 – Зависимость $y_{инп}$ от смещения цикла поворота по точке т3

Для расчета длительностей каждого из этапов цикла перестроения был разработан алгоритм (рисунок 4.12), реализация которого обеспечивает приведение катка в расчетное положение с заданной точностью.

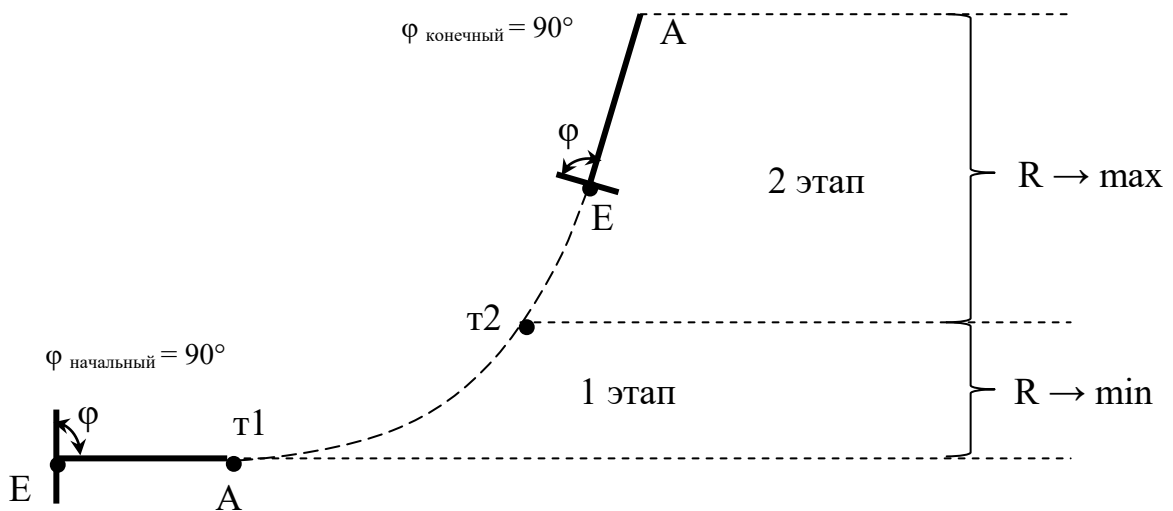
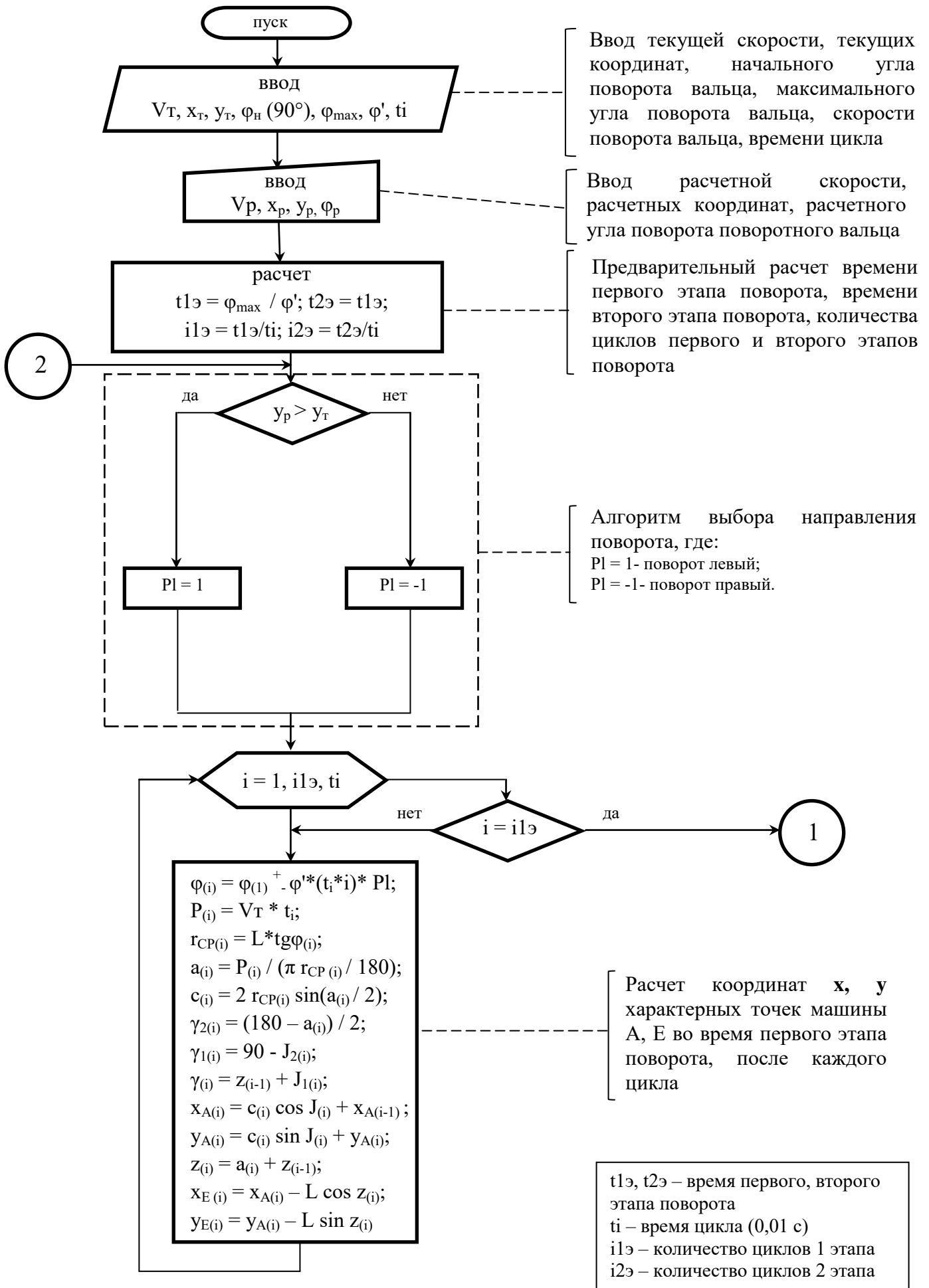


Рисунок 4.11 – Схема поворота катка на заданный угол



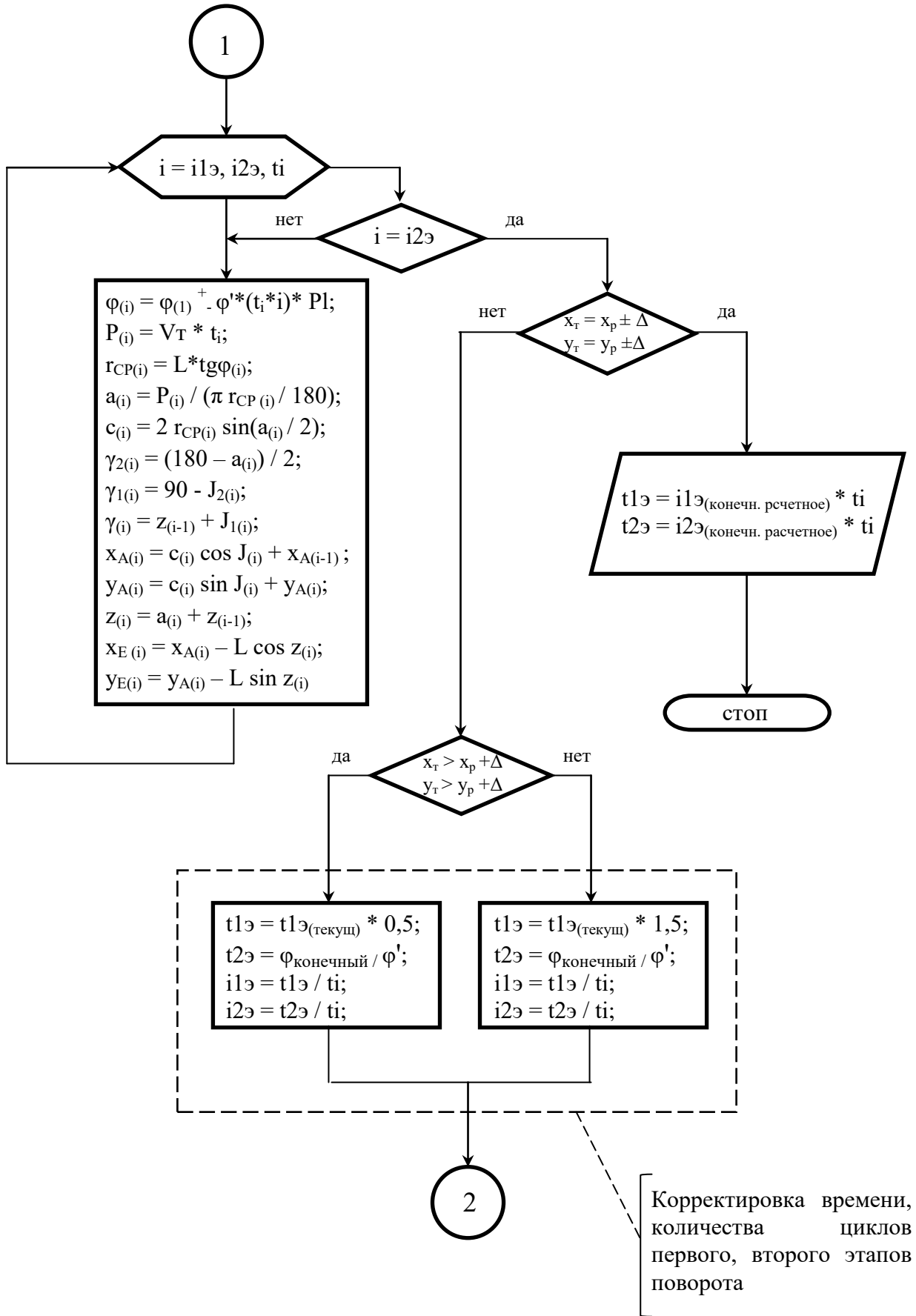


Рисунок 4.12 – Алгоритм определения поворотных точек

В результате расчета на основе данных о текущей скорости, текущих координат, начального угла поворота вальца, максимального угла поворота вальца, максимальной скорости поворота вальца рассчитывается время каждого из двух этапов, обеспечивающих приведение катка в расчетную точку, с заданной точностью. Значение скорости катка и скорости поворота вальца задаются в зависимости от уплотняемого материала, исходя из технологических требований по уплотнению конкретного вида материала.

Полученные данные о времени и скорости поворота вальца являются входными значениями для системы управления движением роботизированного катка.

4.3 Исследования влияния конструктивных и эксплуатационных параметров на значения параметров характеризующих маневренность дорожного катка

Проведенные в разделе 4.1 моделирования траектории движения катка при перестроении на параллельный курс и разворот показали, что величина параметров, характеризующих траекторию движения катка зависит от начальных условий (расчетного случая). В связи с этим необходимо провести исследования и проанализировать влияние начальных условий на данные характеристики. При проведении данных исследований конструктивные параметры: база машины L , скорость поворота поворотного вальца φ' , максимальный угол поворота руля принимали фиксированные значения. Фиксированными параметрами так же были: геометрические и массовые характеристики катка; физико-механические свойства уплотняемой поверхности.

Проведенный анализ показал, что при скорости поворота более 18 град/с возможно смещение уплотняемого материала, что приведет к снижению качества уплотняемой поверхности, появлению трещин. Максимальная скорость поворота руля определялась из условия, что при повороте вальца не происходит смещение

уплотняемого материала. Скорость поворота руля варьировалась в диапазоне 6-18 град/с.

Анализ конструкций существующих катков показал, что база существующих катков варьируется в пределах от 1,5 м, для тротуарных катков, до 3,5 м для дорожных катков. В связи с этим при исследовании база катка варьировалась в пределах от 1, до 3,5 м.

В ходе исследования определялись параметры характеризующие траекторию движения катка при перестроении на параллельный курс: дистанция перестроения, величина смещения поворотного вальца для расчетных случаев 1 и 2.

В ходе теоретических исследований были отработаны режимы перестроения с различными скоростями поворота поворотного вальца φ' для расчетных случаев 1 и 2. На основании полученных числовых значений $x_{\partial n}$ построен график (рисунок 4.13), отражающий зависимость траектории движения машины и, как следствие, значение длины дистанции перестроения ($x_{\partial n}$) уплотняющего катка от угловой скорости поворота вальца для расчетного случая 1 и 2.

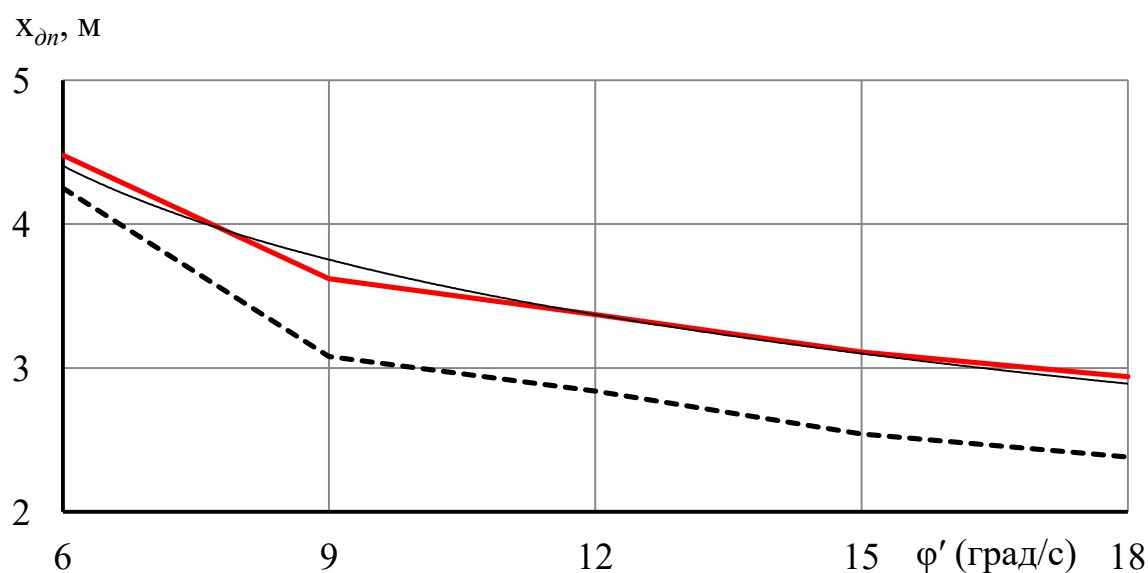


Рисунок 4.13 – Зависимость дистанции перестроения $x_{\partial n}$ от угловой скорости поворота поворотного вальца φ' : 1- расчетный случай (красная сплошная) 2- расчетный случай (черная пунктирная)

На участках 6-9 град/с, 9-12 град/с, 15 -18 град/с зависимость дистанции перестроения от угловой скорости поворотного вальца носит линейный характер. Наиболее существенное влияние на дистанцию перестроения оказывает изменение угловой скорости поворотного вальца в диапазоне от 6 до 9 град/с. В диапазоне 15 – 18 град/с изменение угловой скорости поворота поворотного вальца оказывает несущественное влияние на дистанцию перестроения. Дистанция перестроения в этом случае уменьшается на 5,3%.

В диапазоне угловых скоростей от 9 до 18 град/с для расчетного случая 1 дистанция перестроения в среднем на 5,5% больше, чем для расчетного случая 2.

Таким образом, при проектировании системы управления целесообразно выбирать угловую скорость поворота поворотного вальца до 15 град/с, поскольку дальнейшее увеличение угловой скорости поворота вальца несущественно уменьшает дистанцию перестроения, но может привести к сдвигу уплотняемого материала.

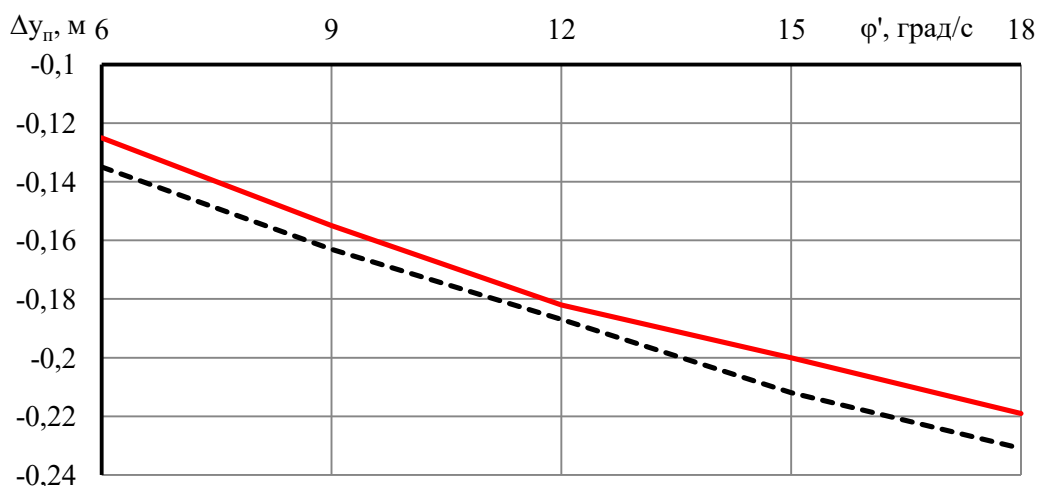


Рисунок 4.14 – Зависимость смещения поворотного вальца при перестроении Δu_n от угловой скорости поворота вальца φ' : расчетный случай 1 (красная сплошная) расчетный случай 2 (черная пунктирная)

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что дистанция перестроения для расчетного случая 1 (движение с постоянной скоростью)

больше, чем в случае расчетного случая 2. Смещение поворотного вальца меньше. В виду того, что технология уплотнения предполагает перестроение дорожного катка на параллельную полосу в начале участка уплотнения, после прямолинейного движения по ранее уплотненной полосе назад, исследование влияния конструктивных параметров дорожного катка на величину параметров, характеризующих траекторию движения катка целесообразно выполнять для расчетного случая 2, как основного алгоритма перестроения.

Следующим этапом исследования было изучение влияния базы катка на величину параметров, характеризующих траекторию движения катка. В ходе исследований скорость катка и скорость поворота руля принимали фиксированные значения. Длина базы катка варьировалась в диапазоне 1,5 – 3,5 м. В ходе исследования моделировалось перестроение катка на параллельную полосу уплотнения и разворот катка на 180° . Исследуемыми параметрами при перестроении были дистанция перестроения и смещение поворотного вальца; при развороте – дистанция и интервал разворота и величина смещения.

В качестве примера на рисунке 4.15 представлена зависимость дистанции перестроения $x_{\text{он}}$ от базы катка L , при скорости катка 2 км/ч.

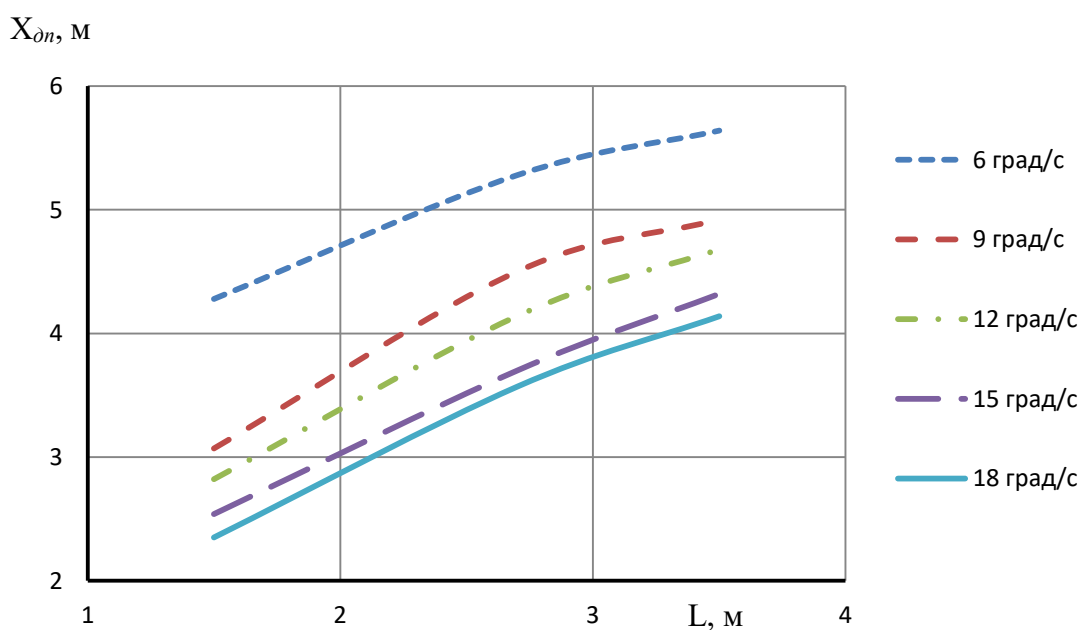


Рисунок 4.15 – Зависимость дистанции перестроения $x_{\text{он}}$ от базы катка L , при скорости катка 2 км/ч

Данные зависимости с достаточно высокой точностью могут быть описаны полиномом второй степени:

$$x_{\partial n} = K_{\partial n1} L^2 + K_{\partial n2} L + K_{\partial n3}, \quad (4.1)$$

где $K_{\partial n1}$, $K_{\partial n2}$ и $K_{\partial n3}$ – коэффициенты, зависящие от скорости поворота поворотного вальца.

В ходе исследований также определялась величина смещения поворотного вальца при перестроении. В качестве примера на рисунке 4.16 показана зависимость смещения поворотного вальца при перестроении Δy_n от базы катка L , при скорости катка 3 км/ч. Анализ полученных зависимостей показал, что смещение поворотного вальца от величины базы катка носит линейный характер, и с достаточной точностью может быть описано выражением

$$\Delta y_n = K_{yn1} L + K_{yn2}, \quad (4.2)$$

где K_{yn1} , K_{yn2} – коэффициенты, зависящие от скорости поворота поворотного вальца.

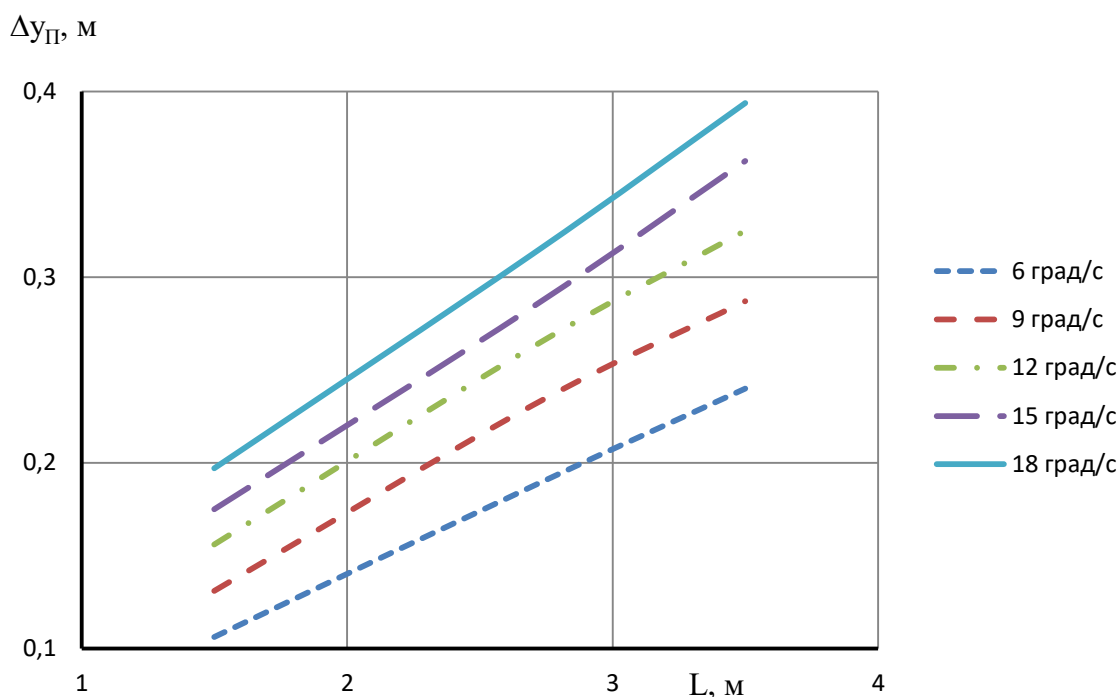


Рисунок 4.16 – Зависимость смещения поворотного вальца при перестроении Δy_n от базы катка L , при скорости катка 3 км/ч

Типовая зависимость дистанции разворота $x_{\partial p}$ от базы катка L , при скорости катка 2 км/ч представлена на рисунке 4.17. Как видно из представленных данных дистанция разворота линейно зависит от базы катка и может быть описана выражением

$$x_{\partial p} = K_{\partial p1} L + K_{\partial p2}, \quad (4.3)$$

где $K_{\partial p1}$, $K_{\partial p2}$ – коэффициенты, зависящие от скорости поворота поворотного вальца.

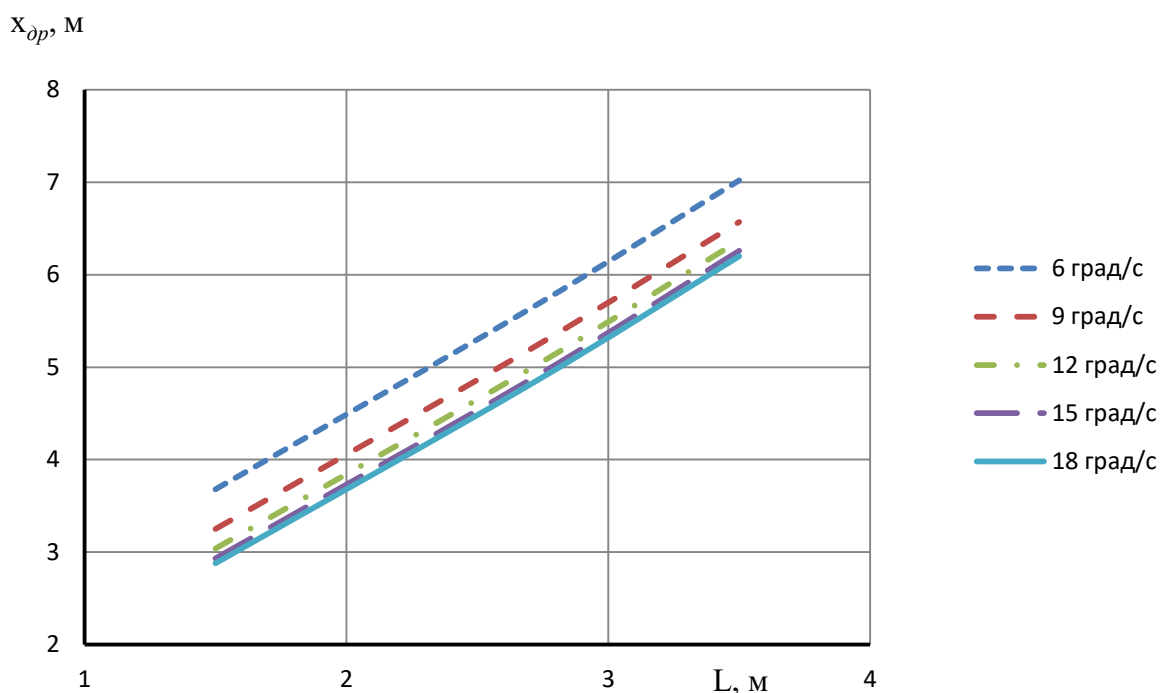


Рисунок 4.17 – Зависимость дистанции разворота $x_{\partial p}$ от базы катка L , при скорости катка 2 км/ч

Зависимость интервала разворота y_{up} от базы катка L , при скорости катка 2 км/ч представлена на рисунке 4.18. Как видно из графика данная зависимость близка к линейной и может быть описана выражением

$$y_{up} = K_{up1} L + K_{up2}, \quad (4.4)$$

где K_{up1} , K_{up2} – коэффициенты, зависящие от скорости поворота поворотного вальца.

Зависимость смещения поворотного вальца Δx_p при развороте от скорости катка, также носит линейный характер и может быть описана выражением

$$\Delta x_p = K_{xp1} L + K_{xp2}, \quad (4.5)$$

где K_{xp1} , K_{xp2} – коэффициенты, зависящие от скорости поворота поворотного вальца.

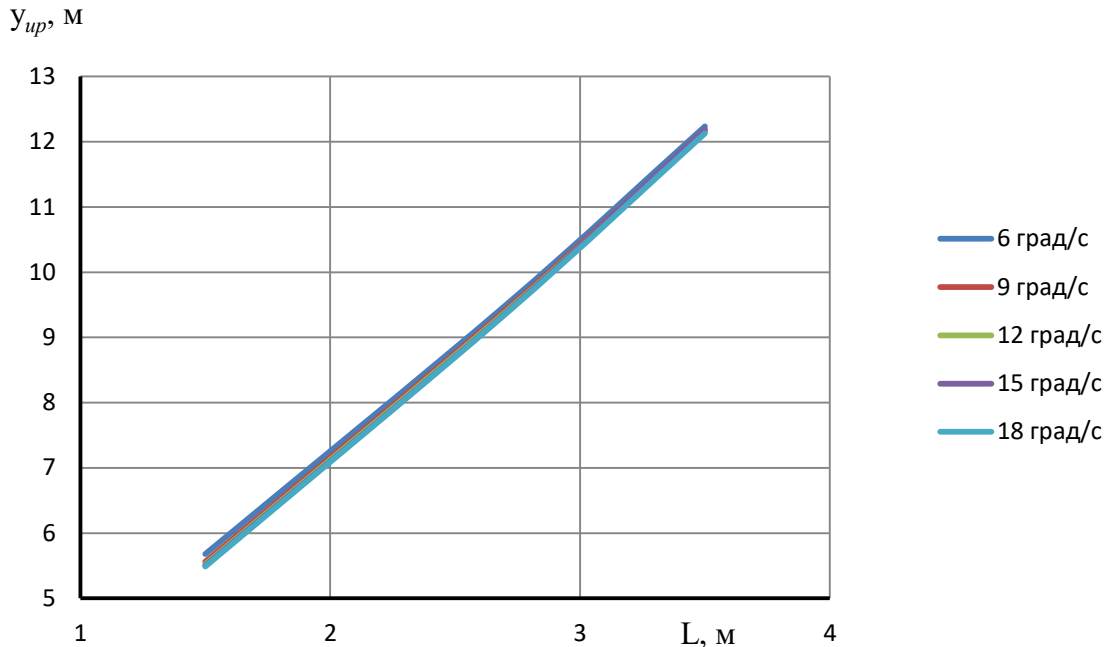


Рисунок 4.18 – Зависимость интервала разворота $y_{ур}$ от базы катка L , при скорости катка 2 км/ч

Таким образом, в ходе проведенного исследования были установлены и описаны линейными и квадратичными зависимостями параметры, характеризующие траекторию движения катка при перестроении на параллельную полосу уплотнения и разворот на 180° от величины базы катка.

В ходе следующего этапа исследования изучалось влияния скорости поворота поворотного вальца на величину параметров, характеризующих траекторию движения катка. В ходе исследований база катка и скорость движения принимали фиксированные значения. Скорость поворота руля варьировалась в диапазоне 6 – 18 град/с. В ходе исследования моделировалось перестроение катка на параллельную полосу уплотнения и разворот катка на 180° . Исследуемыми параметрами при перестроении были дистанция перестроения и смещение поворотного вальца; при развороте – дистанция и интервал разворота и величина смещения.

В качестве примера на рисунках 4.19 и 4.20 представлены зависимости дистанции перестроения и смещение поворотного вальца при перестроении катка на параллельный курс при скорости движения 5 км/ч.

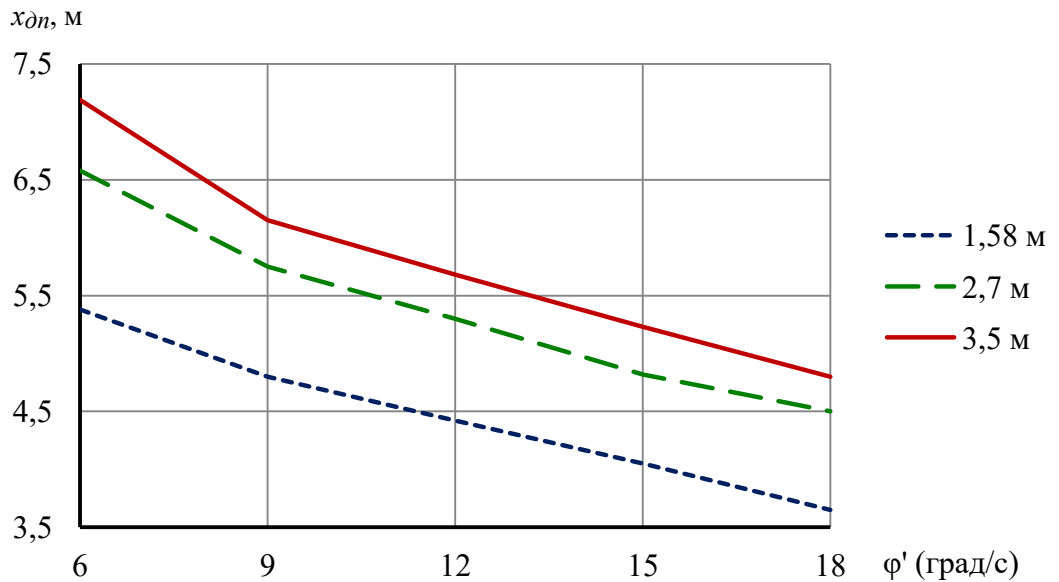


Рисунок 4.19 – Зависимость дистанции перестроения $x_{дн}$ от скорости поворота вальца φ' , при скорости катка 5 км/ч

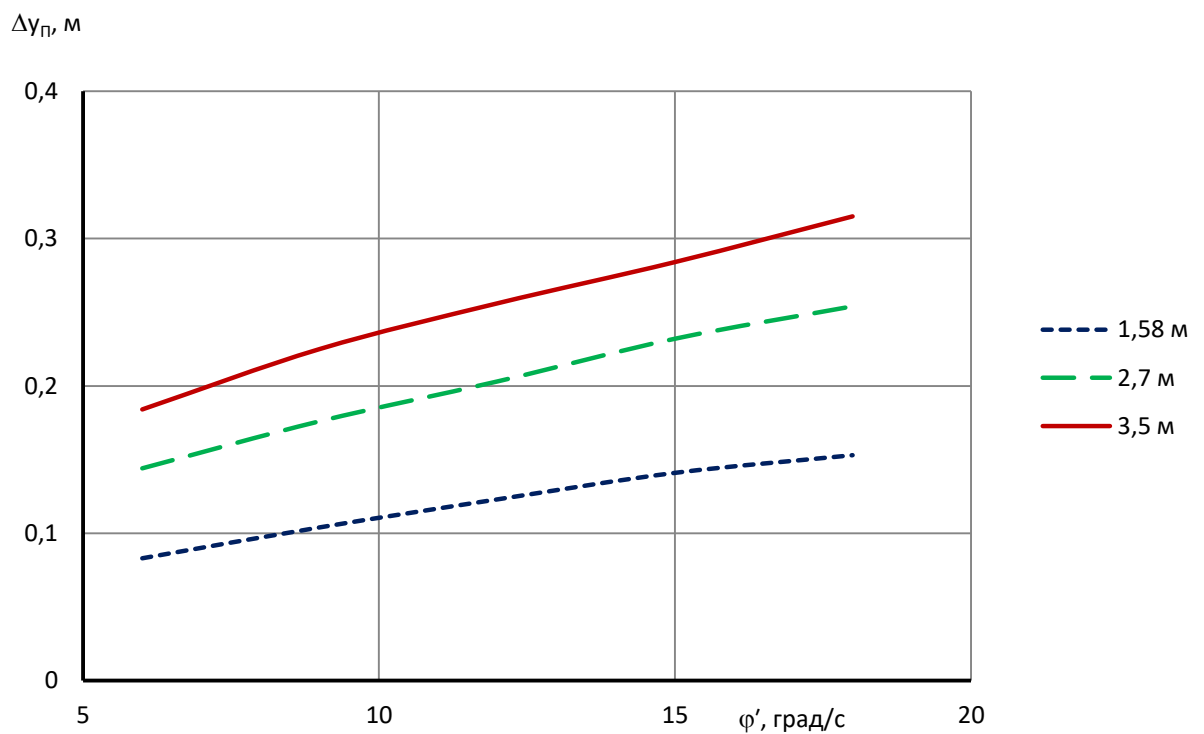


Рисунок 4.20 – Зависимость смещения поворотного вальца при перестроении Δy_n от скорости поворота вальца φ' , при скорости катка 5 км/ч

Зависимость дистанции перестроения наиболее точно может быть описана полиномом второй степени ($R^2 = 0,9068$), тогда как зависимость смещения поворотного вальца от скорости поворота вальца близка к линейной ($R^2 = 0,9947$).

В ходе проведенных исследований были получены коэффициенты $K_{\partial ni}$ и K_{yni} , зависящие от скорости поворота поворотного вальца:

$$K_{\partial n1} = K_{\partial n1.1} (\varphi')^3 + K_{\partial n1.2} (\varphi')^2 + K_{\partial n1.3} (\varphi') + K_{\partial n1.4}, \quad (4.6)$$

$$K_{\partial n2} = K_{\partial n2.1} (\varphi')^3 + K_{\partial n2.2} (\varphi')^2 + K_{\partial n2.3} (\varphi') + K_{\partial n2.4}, \quad (4.7)$$

$$K_{\partial n3} = K_{\partial n3.1} (\varphi')^3 + K_{\partial n3.2} (\varphi')^2 + K_{\partial n3.3} (\varphi') + K_{\partial n3.4}, \quad (4.8)$$

$$K_{yn1} = K_{yn11} (\varphi') + K_{yn12}, \quad (4.9)$$

$$K_{yn2} = K_{yn21} (\varphi') - K_{yn22}, \quad (4.10)$$

где $K_{\partial ni,j}$, K_{ynij} – коэффициенты, зависящие от скорости движения катка.

Типовые зависимости интервала и дистанции разворота, величины смещения поворотного вальца от скорости поворотного вальца представлены на рисунках 4.21 – 4.23.

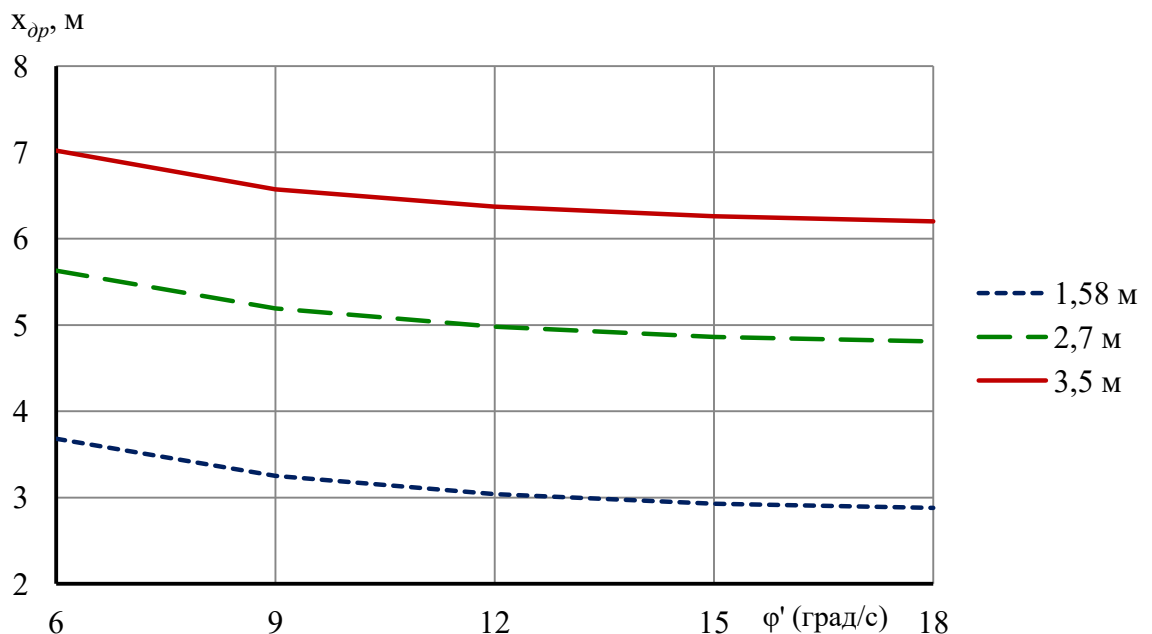


Рисунок 4.21 – Зависимость дистанции разворота $x_{\partial p}$ от скорости поворота вальца φ' , при скорости катка 2 км/ч

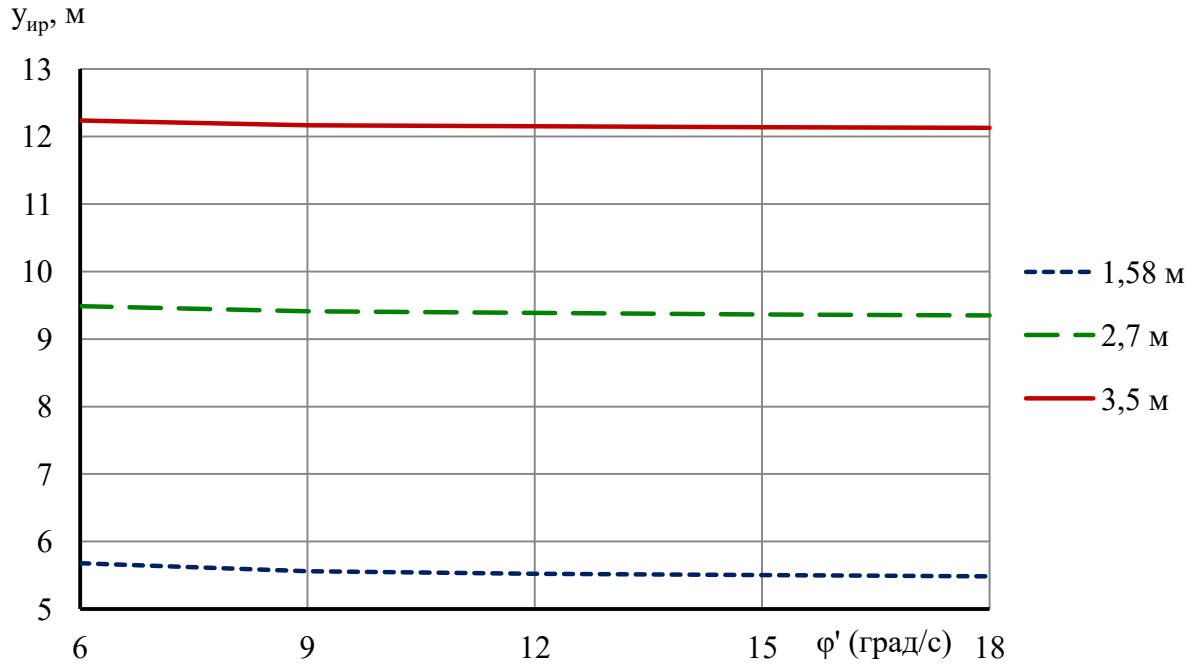


Рисунок 4.22 – Зависимость интервала разворота $y_{ур}$ от скорости поворота вальца ϕ' , при скорости катка 2 км/ч

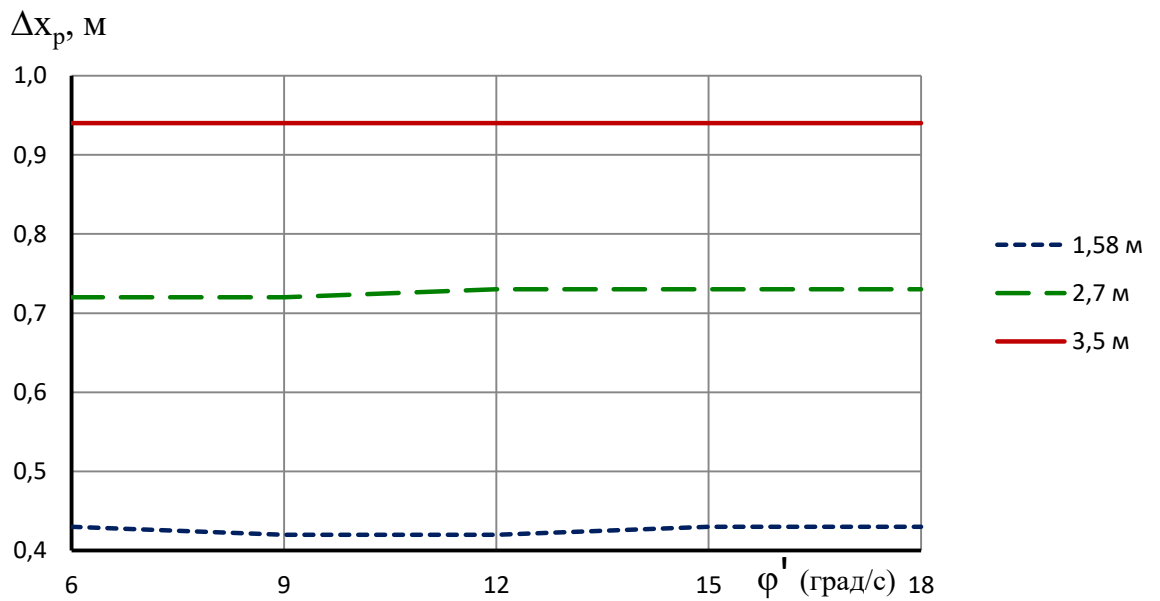


Рисунок 4.23 – Зависимость смещения поворотного вальца Δx_p от скорости поворота вальца ϕ' , при скорости катка 2 км/ч

Как видно из представленных зависимостей интервала разворота $y_{ур}$ и смещения поворотного вальца Δx_p практически не зависят от скорости поворота поворотного вальца.

В результате проведенных исследований были получены коэффициенты $K_{\partial pi}$, $K_{up i}$, $K_{xp i}$ зависящие от скорости поворота поворотного вальца:

$$K_{\partial p1} = K_{\partial p11} (\varphi') + K_{\partial p12}, \quad (4.11)$$

$$K_{\partial p2} = K_{\partial p21} (\varphi')^2 - K_{\partial p22} (\varphi') + K_{\partial p23}, \quad (4.12)$$

$$K_{up1} = K_{up11} (\varphi') + K_{up12}, \quad (4.13)$$

$$K_{up2} = K_{up21} (\varphi')^2 + K_{up22}, \quad (4.14)$$

$$K_{xp1} = K_{xp11} (\varphi') + K_{xp12}, \quad (4.15)$$

$$K_{xp2} = K_{xp21} (\varphi')^2 + K_{xp22}, \quad (4.16)$$

Для получения функциональных зависимостей параметров характеризующих траекторию движения катка от его конструктивных и эксплуатационных параметров, необходимо провести исследования влияния скорости движения катка на величину данных параметров.

В ходе данного этапа исследования изучалось влияние скорости движения катка на величину параметров, характеризующих траекторию движения катка. В ходе исследований база катка и скорость поворота поворотного вальца принимали фиксированные значения. Скорость движения катка варьировалась в диапазоне 2 – 7 км/ч при перестроении и 2 – 5 км/ч при развороте. В ходе исследования моделировалось перестроение катка на параллельную полосу уплотнения и разворот катка на 180° . Исследуемыми параметрами при перестроении были дистанция перестроения и смещение поворотного вальца; при развороте – дистанция и интервал разворота и величина смещения.

В качестве примера на рисунках 4.24 - 4.28 представлены дистанция перестроения и смещение поворотного вальца, дистанция и интервал разворота и величина смещения поворотного вальца при развороте от скорости движения катка.

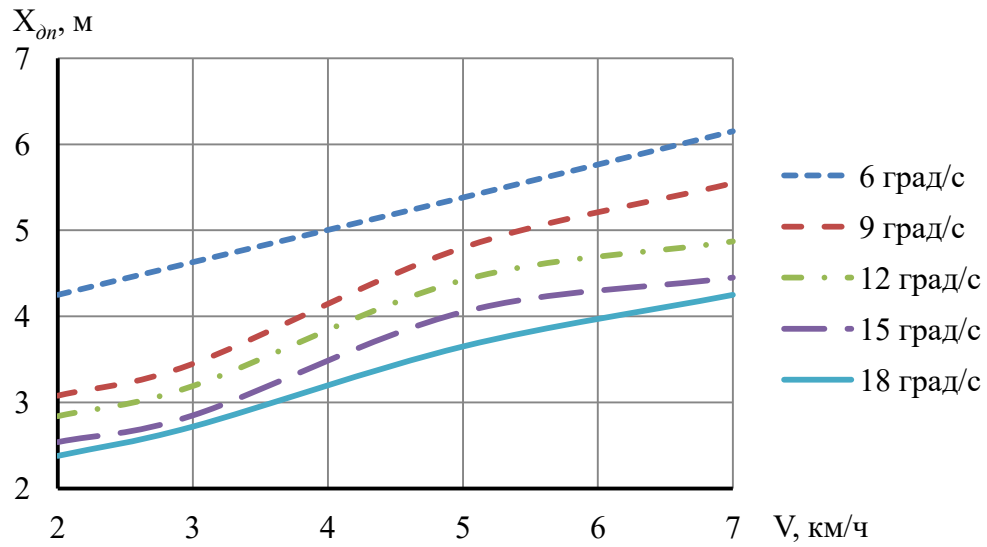


Рисунок 4.24 – Зависимость дистанции перестроения $x_{он}$ от скорости катка V , при длине базы 1,58 м

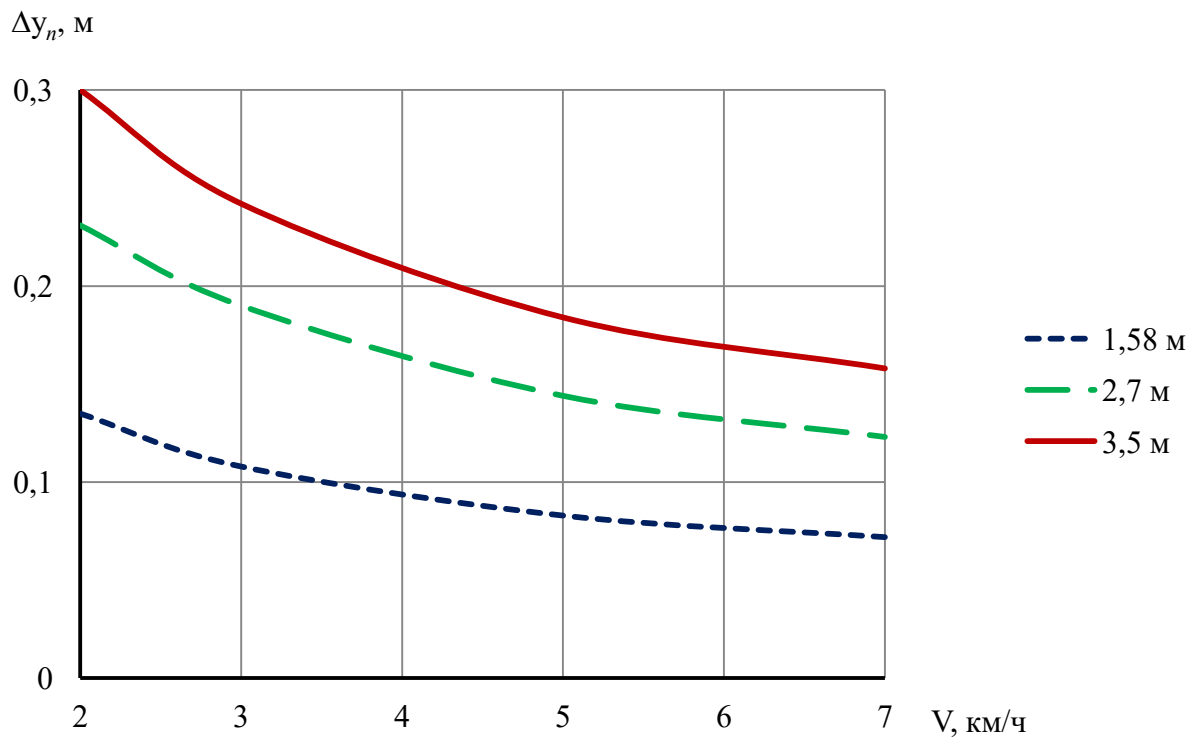


Рисунок 4.25 – Зависимость смещения поворотного вальца Δy_n от скорости катка V , при скорости поворота вальца $\varphi' = 6$ град/с

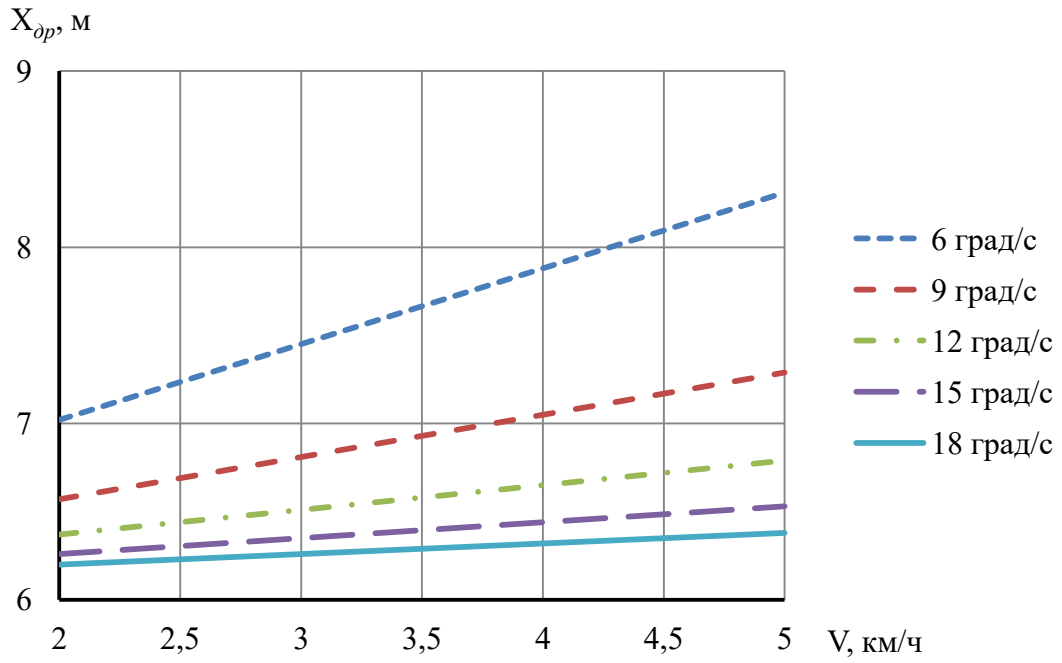


Рисунок 4.26 – Зависимость дистанции разворота x_{dp} от скорости катка, при длине базы $L = 3,5$ м

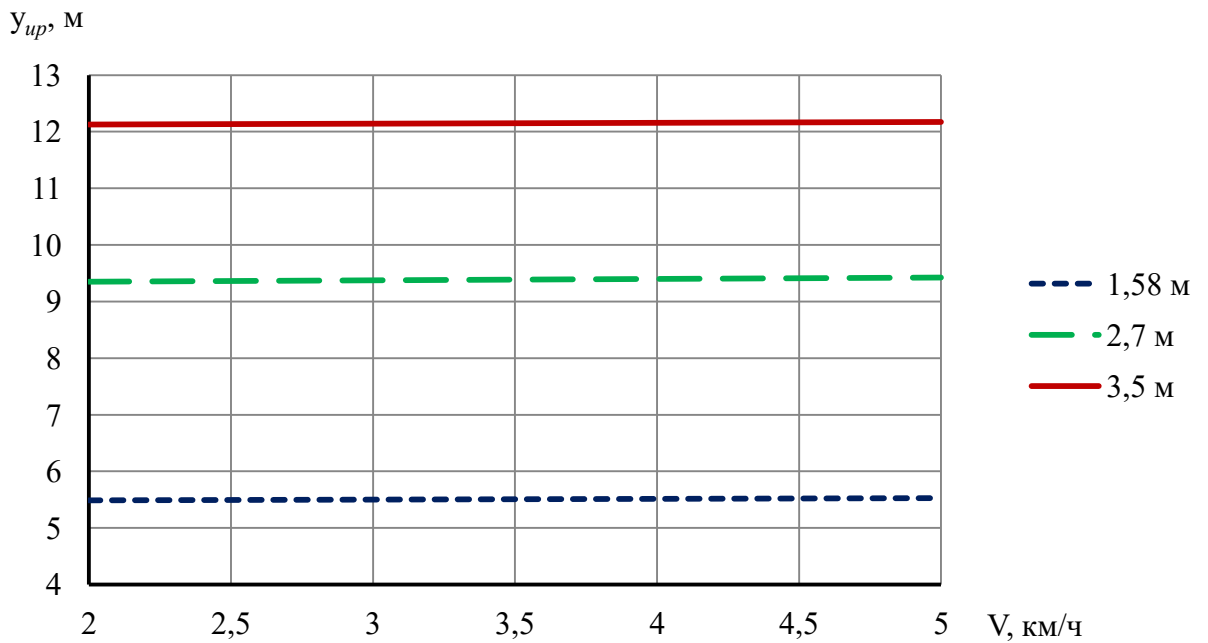


Рисунок 4.27 – Зависимость интервала разворота y_{up} от скорости катка, при скорости поворота вальца $\varphi' = 18$ град/с

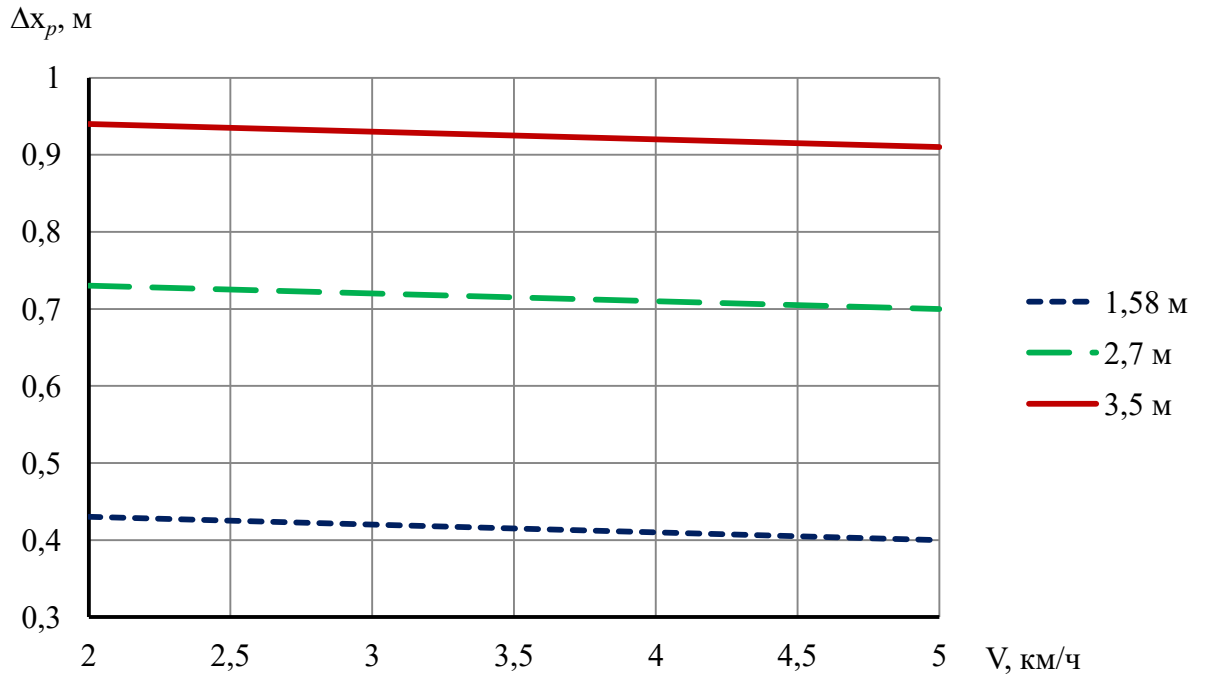


Рисунок 4.28 – Зависимость смещения поворотного вальца Δx_p при развороте от скорости катка, при скорости поворота вальца $\varphi' = 18$ град/с

В результате проведенных исследований были получены коэффициенты $K_{\partial n i . j}$, $K_{y n i . j}$, $K_{\partial p i j}$, $K_{u p i j}$, $K_{x p i j}$ зависящие от скорости движения катка:

$$K_{\partial n 1.1} = 0,0003V - 0,0018, \quad (4.17)$$

$$K_{\partial n 1.2} = -0,0103V + 0,0703, \quad (4.18)$$

$$K_{\partial n 1.3} = 0,1188V - 0,7981, \quad (4.19)$$

$$K_{\partial n 1.4} = -0,3717V + 2,4147, \quad (4.20)$$

$$K_{\partial n 2.1} = -0,0018V + 0,0111, \quad (4.21)$$

$$K_{\partial n 2.2} = 0,07V - 0,4242, \quad (4.22)$$

$$K_{\partial n 2.3} = -0,8481V + 4,9657, \quad (4.23)$$

$$K_{\partial n 2.4} = 2,8962V - 15,167, \quad (4.24)$$

$$K_{\partial n 3.1} = 0,0027V - 0,0164, \quad (4.25)$$

$$K_{\partial n 3.2} = -0,108V + 0,6434, \quad (4.26)$$

$$K_{\partial n3.3} = 1,3599V - 7,9696, \quad (4.27)$$

$$K_{\partial n3.4} = - 4,4625V + 29,658, \quad (4.28)$$

$$K_{yn11} = - 0,0001 V + 0,0029, \quad (4.29)$$

$$K_{yn12} = - 0,0081 V + 0,0778, \quad (4.30)$$

$$K_{yn21} = - 0,0006 V + 0,0052, \quad (4.31)$$

$$K_{yn22} = 0,0044 V - 0,0281, \quad (4.32)$$

$$K_{\partial p11} = - 0,0001 V - 0,0004, \quad (4.33)$$

$$K_{\partial p12} = 0,033 V + 1,601, \quad (4.34)$$

$$K_{\partial p21} = 0,0033 V + 0,0002, \quad (4.35)$$

$$K_{\partial p22} = 0,1099 V + 0,0061, \quad (4.36)$$

$$K_{\partial p23} = 0,7228V + 0,8189, \quad (4.37)$$

$$K_{up11} = 0,0061 V - 0,0085, \quad (4.38)$$

$$K_{up12} = - 0,1064 V + 3,6029, \quad (4.39)$$

$$K_{up21} = - 0,0267V + 0,0315, \quad (4.40)$$

$$K_{up22} = 0,4931V - 0,5709, \quad (4.41)$$

$$K_{xp11} = 0,006 V + 0,2532, \quad (4.42)$$

$$K_{xp12} = - 0,0156 V + 0,0401, \quad (4.43)$$

$$K_{xp21} = 0,2658, \quad (4.44)$$

$$K_{xp22} = - 0,01 V + 0,0308, \quad (4.45)$$

Таким образом, в ходе проведенных исследований были получены функциональные зависимости параметров описывающих траекторию движения катка при выполнении маневра перестроения и разворота от длины базы, скорости поворота поворотного вальца и скорости катка, характеризующих его маневренность.

Дистанция перестроения катка может быть определена с помощью выражений 4.1, 4.6-4.8, 4.17-4.28.

Смещение поворотного вальца при перестроении определяется набором выражений 4.2, 4.9, 4.10, 4.29-4.32.

Дистанция разворота катка определяется набором выражений 4.3, 4.11-4.12, 4.33-4.37.

Интервал разворота катка определяется с помощью выражений 4.4, 4.13, 4.14, 4.38-4.41.

Величина смещения поворотного вальца при развороте определяется выражениями 4.5, 4.15-4.16, 4.42 – 4.45.

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

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, которые позволяют провести на этапе проектирования дорожного катка предварительную оценку маневренных характеристик катка на соответствие требований технического задания на разработку дорожного катка без проведения.

Выводы по главе

1. Определены параметры, характеризующие маневренность катка и описывающие траекторию его движения при выполнении маневра перестроения на параллельный курс и разворот 180° : дистанция и интервал перестроения на

параллельный курс, смещение поворотного вальца при перестроении, дистанция и интервал разворота, смещение поворотного вальца при развороте.

2. Проведенный в работе анализ показал, что требуемая траектория движения катка может быть представлена в виде сочетания прямолинейных участков движения и поворотов на определенный угол. Так процесс перестроения на параллельный курс можно представить в виде 4 этапов последовательного поворота поворотного вальца на определенный угол. В свою очередь данные 4 этапа могут быть представлены в виде сочетания двух кривых поворота катка на заданный угол.

3. Разработан алгоритм работы системы управления поворотом катка при выполнении маневра, обеспечивающий требуемый интервал перестроения и разворота. Доказано, что величина интервала перестроения и интервала разворота катка полностью определяются алгоритмом работы системы управления поворотом дорожного катка

4. 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, 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 $R^2 = 0,9068$) получать значения параметров характеризующих траекторию движения катка при выполнении маневра перестроения и разворота для длины базы в диапазоне 1,5 – 3,5м, скорости поворота поворотного вальца в диапазоне 6 – 18 град/с и скорости катка в диапазоне 2 – 7 км/ч.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Экспериментальные исследования дорожного катка

Задачей экспериментальных исследований являлось подтверждение адекватности математической модели методом сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований.

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.

В качестве базовой машины, на которой проводились исследования, был взят дорожный каток ДУ – 107, вибрационный, трехосный, трех вальцовый, предназначенный для уплотнения асфальтобетонных покрытий и гравийно - щебеночных смесей в условиях ограниченной маневренности (тротуарный).

Общий вид и основные конструктивные элементы ДУ – 107 представлены на рисунке 5.1.

Варьируемым параметром, при проведении эксперимента, была дистанция перестроения, ограниченная минимальными и максимальными значениями, полученными при теоретических исследованиях, для движения машины на эксплуатационных скоростях с заданными скоростями поворота поворотного вальца.

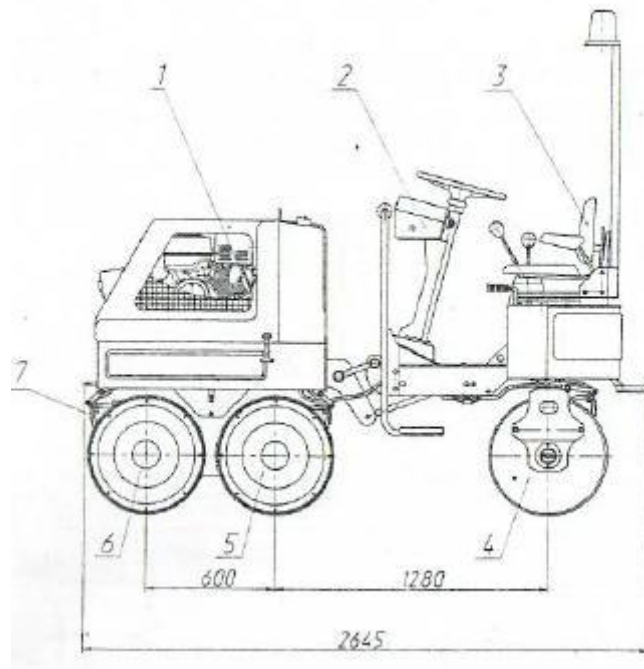


Рисунок 5.1 – Общий вид катка ДУ – 107:

1 – силовая установка; 2 – электрооборудование; 3 – рабочее место оператора; 4 – поворотный валец; 5 – валец приводной статический; 6 – валец приводной вибрационный; 7 – скребки и смачивающая система

Регистрируемыми параметрами являлись:

- скорость дорожного катка;
- скорость поворота поворотного вальца;
- траектория движения дорожного катка (координаты).

Исследования проводились на базе СибАДИ «Сибирский государственный автомобильно – дорожный университет».

Эксперимент проводился в закрытом помещении, в светлое время суток при естественном освещении. При температуре окружающего воздуха находящейся в пределах от + 18 до + 20 °С. Основание, по которому перемещался каток – бетонная плитка. (Рисунок 5.2)



Рисунок 5.2 – Экспериментальные исследования дорожного катка ДУ – 107

В виду отсутствия на машине штатных приборов контроля скорости, при проведении исследований, для определения скорости движения машины, использовался метод видеофиксации движущегося объекта. На боковой поверхности вальца приводного вибрационного была нанесена разметка. Разметка катка представляла 8 равномерно размещенных меток по окружности вальца, под углом 45° , расстояние между которыми составляло 216 мм по окружности и контрольная метка на корпусе машины, являющаяся точкой отсчета и контроля перемещения меток на вальце.

Для видеофиксации перемещения меток использовалась экшн-камера DIGMA DICam 410 4K, с частотой видеозаписи 30 кадров / сек [112].

Перемещение меток на вальце относительно контрольной метки на корпусе машины являлось сигналами фиксируемыми видеокамерой. При этом частота фиксации более чем вдвое превышала частоту спектра сигнала, что, в соответствии с теоремой Котельникова, обеспечивало условие [33]:

$$t_{\text{discr}} \geq 2 * F_{\text{max}}$$

и позволило при поккадровом просмотре, и анализе видеоматериала, произвести расчеты скорости машины с требуемой точностью.

Оборудование и приспособления для фиксации и расчета скорости машины представлены на рисунке 5.3



Рисунок 5.3 – Оборудование и приспособление для определения скорости катка

Для фиксации и расчета скорости поворота поворотного вальца использовалось устройство, представляющее из себя транспортер, закрепленный на неподвижной задней раме на корпусе машины, над поворотным вальцом и стрелкой, закрепленной по центру вальца, перпендикулярно его продольной оси, на скребке.

При повороте вальца, происходило перемещение стрелки относительно числовой разметки транспортера. Перемещение стрелки фиксировалось видеокамерой DIGMA DICam 410 4K, размещенной над транспортером и неподвижно закрепленной.

Оборудование и приспособления для фиксации и расчета скорости поворота поворотного вальца представлены на рисунке 5.4.

Диапазон числовой разметки транспортера находился в пределах $40^{\circ} \div 140^{\circ}$ (максимальный угол поворота вальца). Частота числовой разметки транспортера

- 10° и частота видеосъемки – 30 к/сек, также обеспечили требуемую точность передачи сигнала и расчета скорости при покадровом анализе материала.



Рисунок 5.4 - Оборудование и приспособление для фиксации и расчета скорости поворота поворотного вальца машины

Фиксация траектории движения осуществлялась маркерами, представляющими собой полую трубку заряженную мелом. При перемещении маркера по дорожному основанию, на поверхности оставался меловой след фиксирующий траекторию их движения. Маркеры жестко крепились к корпусу машины и были расположены:

1. В переднем правом углу машины.
2. Справа на центральной оси поворотного вальца.

Размещение маркеров на машине показано на рисунке 5.5.

Таким образом, по меловому следу маркеров определялась и фиксировалась траектория движения характерных точек машины и последующий расчет траектории базовых точек.

Также, для контроля движения машины, была нанесена разметка на переднем и поворотном вальцах, по окружности вальцов, по центральной оси машины. Разметка окружности вальцов представлена на рисунке 5.5.

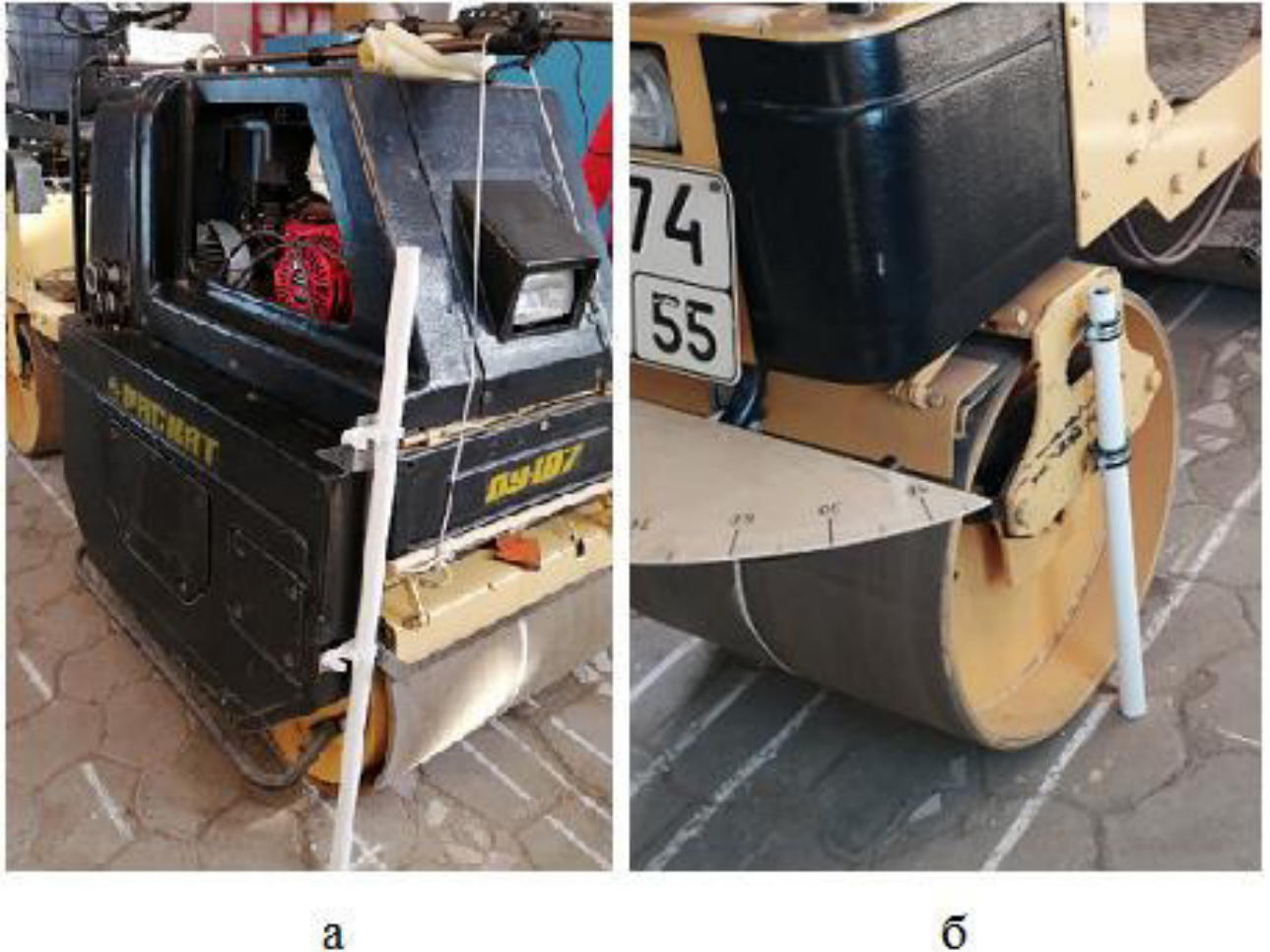


Рисунок 5.5 – Размещение маркеров на машине

а – маркер 1; б – маркер 2

Для фиксации и контроля траектории движения использовались видеокамеры DIGMA DICam 410 4K расположенные:

1. В передней части, над центральной продольной осью машины, направленная на дорожную поверхность.
2. В конце полосы движения машины, с зоной охвата видеосъемкой всего участка маневрирования.

Расположение камер представлено на рисунке 5.6.

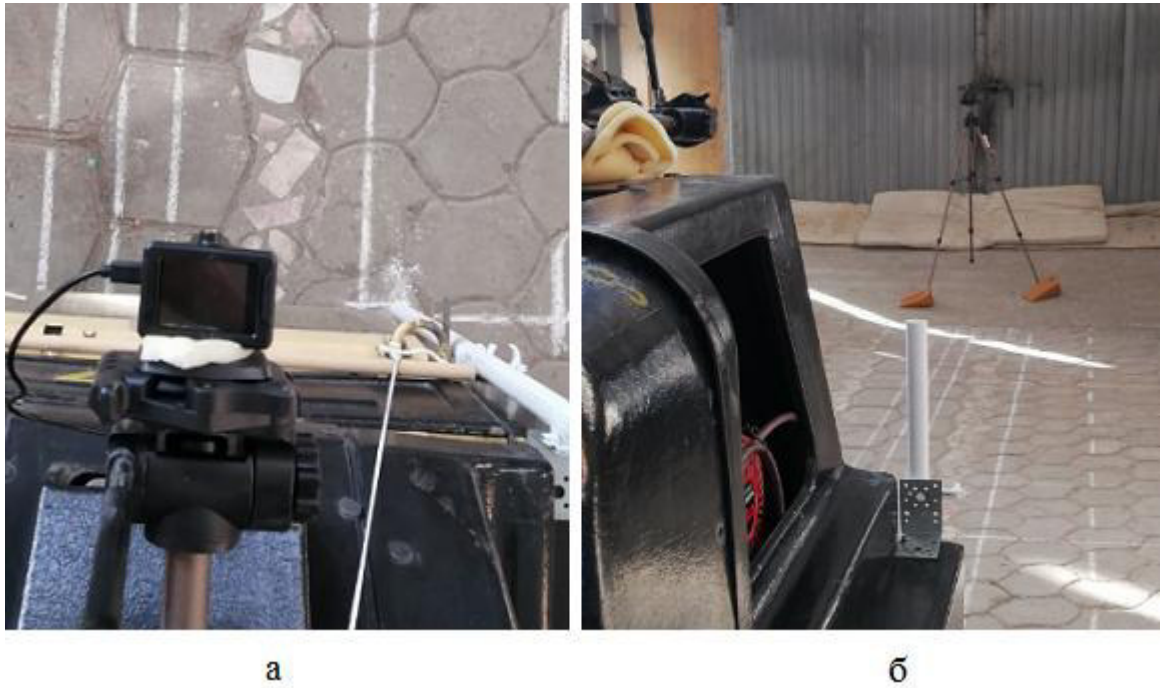


Рисунок 5.6 – Расположение камер для фиксации траектории движения:
а – камера 1; б – камера 2

Для проведения эксперимента был подготовлен полигон. (Рисунок 5.7)

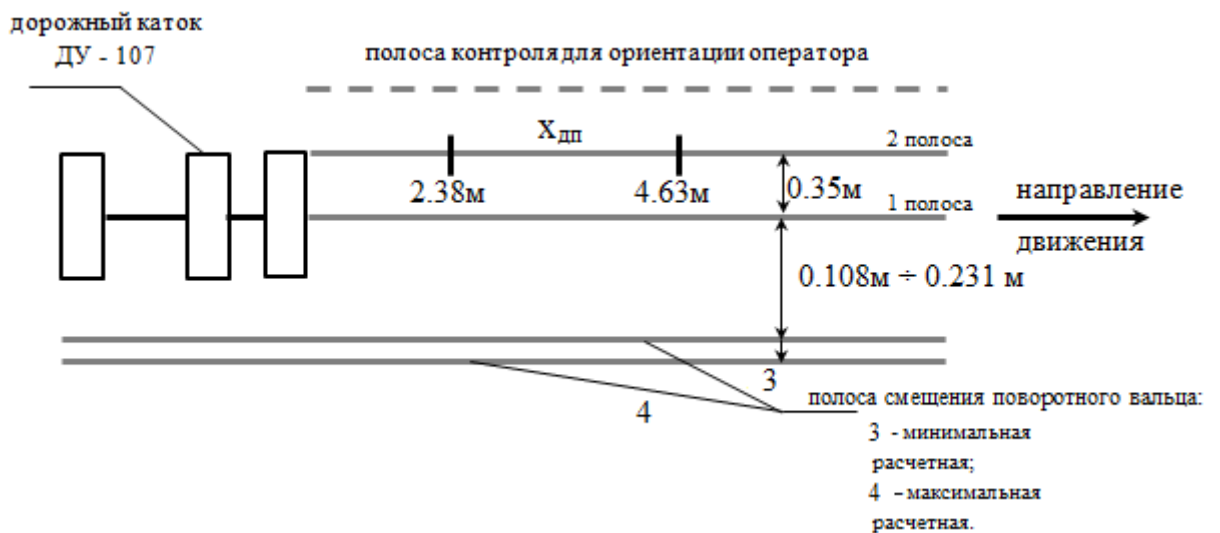


Рисунок 5.7 – Схема полигона

На дорожное основание нанесена разметка обозначающая:

- 1 полоса – полоса, для прямолинейного движения располагающаяся по продольной оси машины;

- 2 полоса – полоса параллельная первой полосе, смещенная на 0.35 м, обозначающая полосу перестроения;

(На второй полосе нанесена разметка на расстоянии 2.38 м и 4.63 м от точки начала движения машины, фиксирующая минимальные и максимальные значения дистанции перестроения, полученные в ходе теоритического исследования, при движении машины с эксплуатационными скоростями, и заданными скоростями поворота поворотного вальца.)

- 3 и 4 полосы смещения поворотного вальца, обозначающие предельные значения смещения поворотного вальца, полученные в ходе теоритического исследования и расположенные параллельно 1 полосе, со смещением 0.108 и 0.231 м соответственно.

На рисунке 5.8 представлена схема проведения эксперимента по определению фактической траектории перестроения катка на параллельную полосу уплотнения.

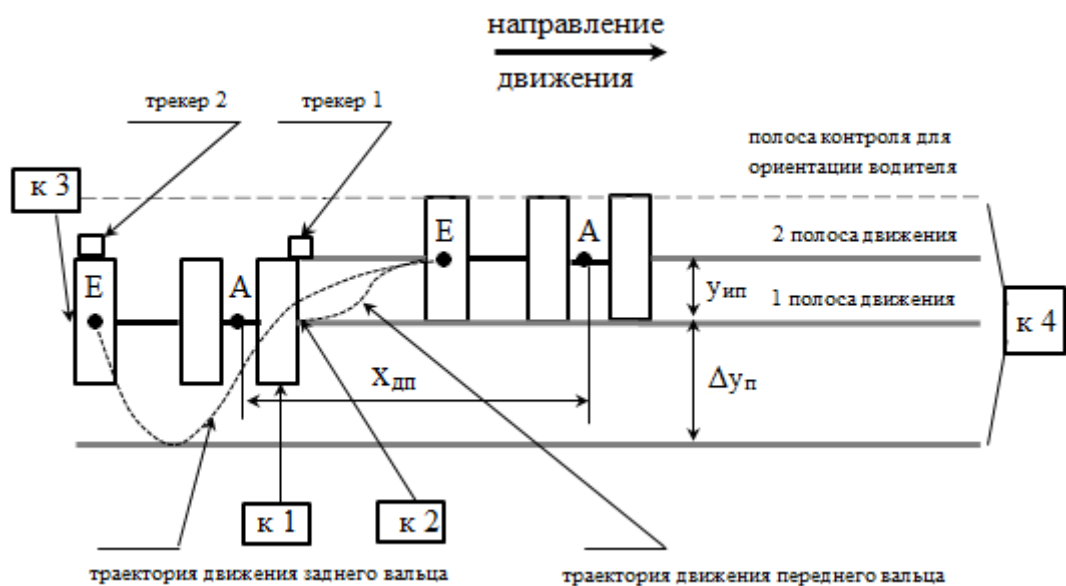


Рисунок 5.8 – Схема эксперимента:

АЕ – база машины; к1 – камера фиксирующая движение вальца для расчета скорости; к2 – камера траекторию движения машины; к3 – камера фиксирующая транспортёр для расчета скорости поворота поворотного вальца; к4 – камера фиксирующая траекторию движения машины; $x_{дп}$ – дистанция перестроения; $y_{инп}$ – интервал перестроения; $\Delta y_{п}$ – смещение поворотного вальца

Адекватность – это качество точно отображать фактические процессы, проходящие в синтезируемом объекте с заданной точностью при изменении его параметров и внешних воздействий [1].

Представленная в данной работе математическая модель позволяет определять эксплуатационные, конструктивные параметры роботизированного дорожного катка, обеспечивающие выполнение машиной стоящих задач, на основании предъявляемых критериев эффективности.

Адекватность математической модели подтверждалась путем сравнения численных результатов характеристик траектории движения базовой машины, эксплуатационных параметров и режимов, полученных во время теоритических и экспериментальных исследований.

В ходе проведения эксперимента было произведено три заезда с перестроением на параллельную полосу движения (2 полоса движения), на установленный интервал $0.35 \text{ м} \pm 0.05 \text{ м}$, на различные дистанции перестроения. Произведена фиксация эксплуатационных параметров: скорости машины, скорости поворота поворотного вальца. Зафиксирована траектория движения машины. Результаты представлены в таблице 5.1

Таблица 5.1 – Численные результаты экспериментальных исследований

параметр № заезда	$X_{дп}$ (М)	$\Delta y_{п}$ (М)	V машины (м/с (км/ч))	φ (град/с)	$y_{инп}$ (М) А - Е
1 заезд	3.8	- 0.2	0.5 (1.8)	10	0.34 – 0.36
2 заезд	3.1	- 0.24	0.49 (1.8)	14	0.30 – 0.32
3 заезд	2.5	- 0.26	0.56 (2.02)	19	0.36 – 0.33

Анализ полученных результатов показал:

1. Значения интервала перестроения $y_{инп}$ при всех перестроениях находятся в допуске и не выходят за пределы $0.35 \pm 0,05 \text{ м}$.
2. Дистанция перестроения $x_{дп}$ в каждом заезде последовательно сокращается на примерно равные значения.

3. Скорость движения машины V во всех заездах с погрешностью, не превышающей 10% совпадает с задаваемыми значениями V при теоритических исследованиях и составляет 2 км/ч (0,55 м/с).

4. Скорость поворота поворотного вальца φ с каждым заездом последовательно увеличивается. Значения φ максимально или с незначительной погрешностью совпадают с задаваемыми значениями при теоритических исследованиях.

5. Значения смещения поворотного вальца Δy_n в каждом заезде последовательно увеличиваются.

По зафиксированным трекам, представленным на рисунке 5.9, определены численные значения координат движения базовых точек машины.

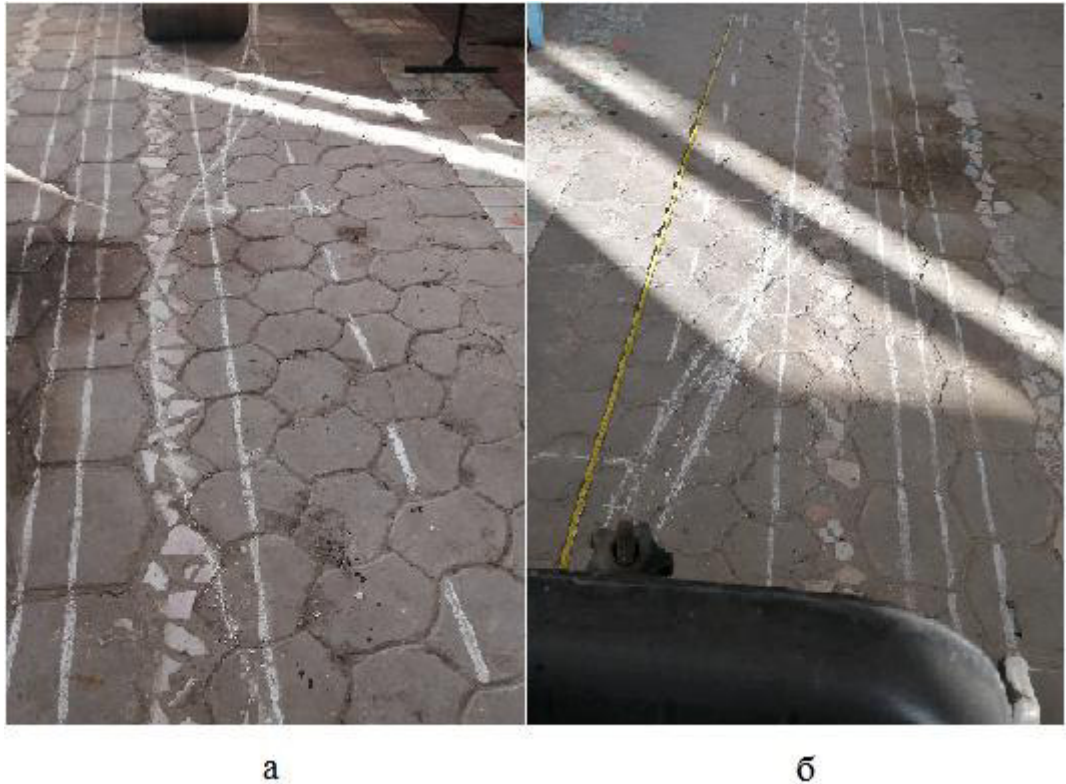


Рисунок 5.9 – Треки движения дорожного катка:

а – первый заезд ; б – три заезда

На рисунке 5.10 представлено сравнение траекторий движения полученных при теоритических исследованиях и траектории движения базовой машины полученной экспериментально в первом заезде.

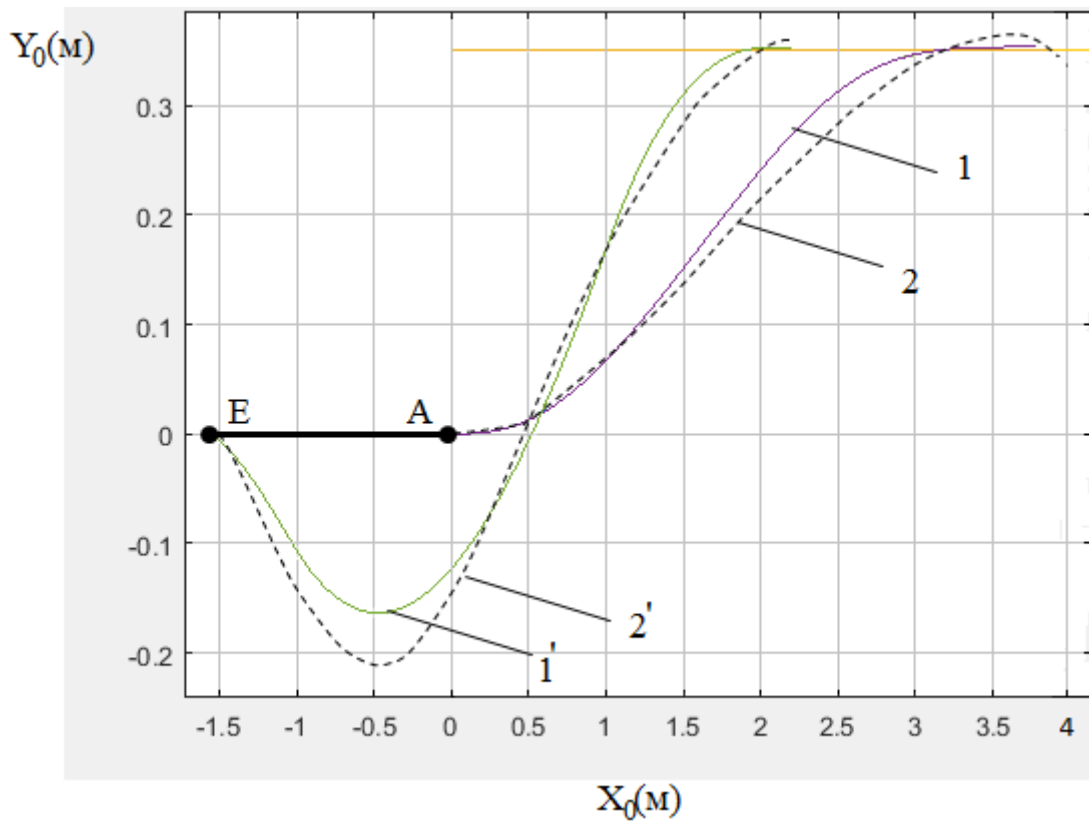


Рисунок 5.10 – сравнение траекторий движения ДУ – 107:

- 1, 1' – траектория базовых точек катка А, Е полученная теоритически;
- 2, 2' - траектория базовых точек катка А, Е полученная экспериментально

В качестве примера на рисунке 5.11 представлены зависимости угла поворота вальца от времени, полученные в ходе теоретических и экспериментальных исследований.

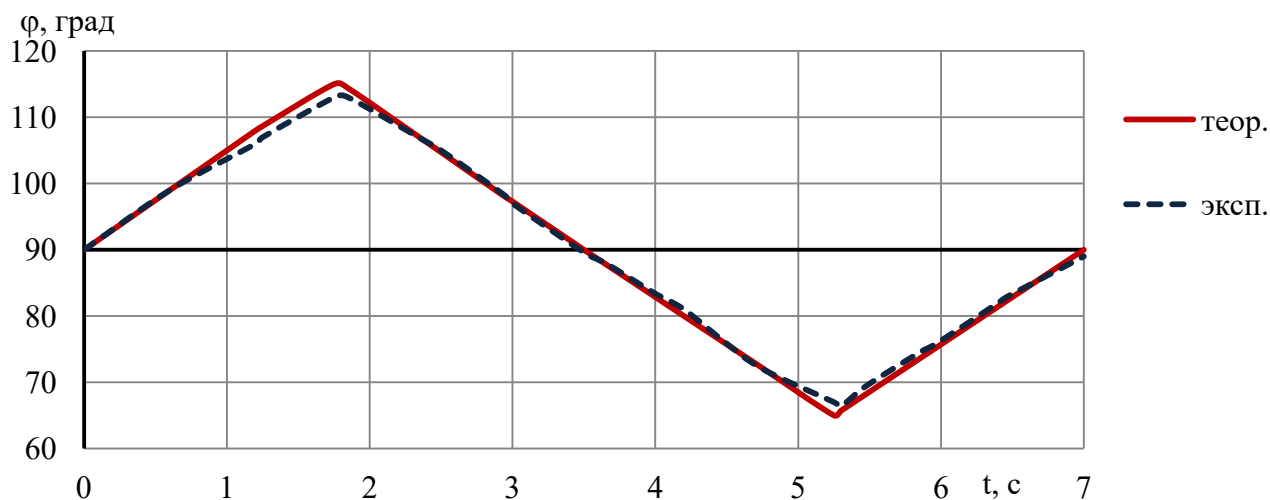


Рисунок 5.11 – Зависимость угла поворота вальца от времени, сплошная линия – теоретическая; пунктирная – экспериментальная

Основные эксплуатационные параметры дорожного катка при движении по сравниваемым траекториям:

- скорость движения машины заданная при теоритических исследованиях – 0.55 м/с (2 км/ч);
- скорость движения машины, полученная при экспериментальных исследованиях – 0.5 м/с (1.8 км/ч);
- скорость поворота поворотного вальца заданная при теоритических исследованиях – 9 град/с;
- скорость поворота поворотного вальца, полученная при экспериментальных исследованиях – 10 град/с.

Данные экспериментальных исследований, представленных в таблице 5.1 подтвердили линейный характер зависимости параметров траектории движения базовой машины, от эксплуатационных параметров и режимов.

Значения скорости машины и скорости поворота поворотного вальца совпадают с заданными при теоритических исследованиях идентичными параметрами, что позволяет провести сравнение численных значений параметров траектории и определить их погрешность.

На рисунке 5.12 графически показано сравнение зависимостей дистанции перестроения $x_{дп}$ от скорости поворота поворотного вальца.

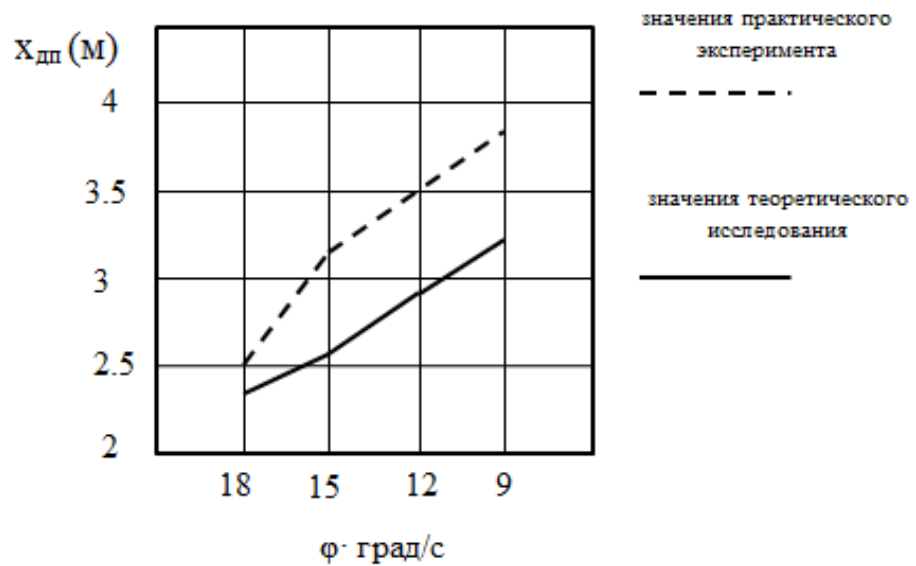


Рисунок 5.12 - Сравнение зависимостей дистанции перестроения $x_{дп}$ от скорости поворота поворотного вальца

На рисунке 5.13 показано сравнение зависимости численного значения смещения поворотного вальца Δy_n от скорости поворота поворотного вальца.

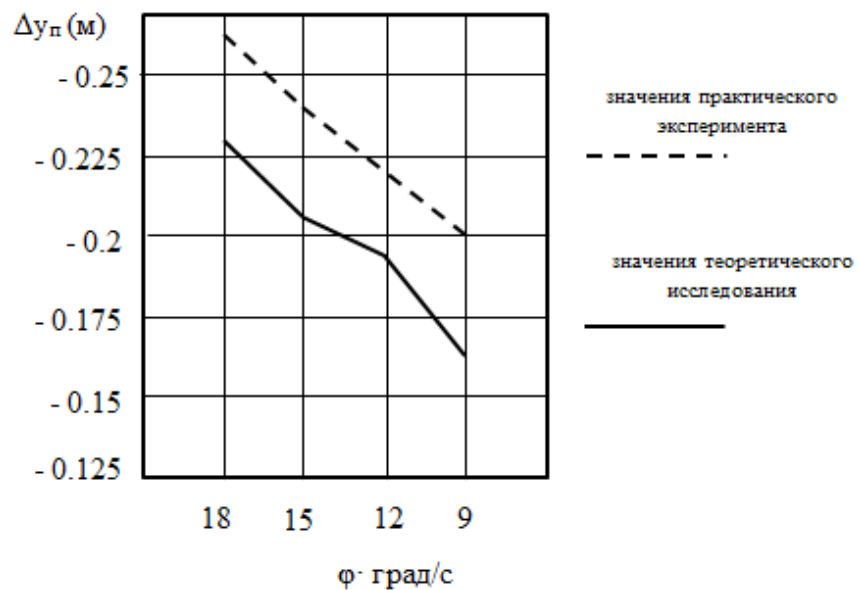


Рисунок 5.13 - Сравнение зависимости численного значения смещения поворотного вальца Δy_n от скорости поворота поворотного вальца

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Анализ данных, полученных при экспериментальных исследованиях, подтвердил тенденцию изменения параметров траектории движения дорожного катка, при варьировании эксплуатационными параметрами отмеченную при теоритических исследованиях:

- с увеличением скорости поворота вальца φ' , уменьшается значение дистанции перестроения x_{on} ;

- с увеличением скорости поворота вальца φ' , величина смещения поворотного вальца Δy_n увеличивается.

2. Значения параметров x_{on} , Δy_n траектории полученной экспериментально при варьировании φ' с достаточной степенью точности совпадают с результатами теоритических исследований. Величина относительной погрешности в среднем составляет 14% и не превышает 18%.

3. Характер траектории движения дорожного катка при теоритических и экспериментальных исследованиях совпадает.

Таким образом, можно сделать вывод об адекватности математической модели.

5.2 Методика выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров дорожного катка, обеспечивающих требуемые параметры траектории движения катка

Проведенные теоритические и экспериментальные исследования позволили создать методику выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров роботизированного дорожного катка, на основании критериев эффективности предъявляемых нормативной и технологической документацией по уплотнению дорожных оснований и покрытий.

Поэтапное выполнение предложенной методики позволит определять основные конструктивные и эксплуатационные параметры и режимы при

создании, в том числе и роботизированных дорожных катков и программировании их систем управления.

Методика включает:

1 этап - Ввод основных проектных значений параметров дорожного полотна:

- ширина уплотняемого слоя h_{yc} ;
- длина уплотняемого участка $l_{уч}$;
- наименьший радиус кривых в плане R_{min} ;
- допустимые отклонения от проектных значений $d_{пр}$;

2 этап - Ввод основных параметров траектории движения:

- дистанция перестроения $x_{дп}$;
- интервал перестроения $y_{ип}$;
- смещение поворотного вальца при перестроении $\Delta y_{п}$;
- дистанция разворота $x_{др}$;
- интервал разворота $y_{ир}$;
- смещение поворотного вальца при развороте $\Delta x_{р}, \Delta y_{р}$;

3 этап - Определение конструктивных параметров роботизированного дорожного катка:

- база машины L ;

4 этап - Анализ полученных значений конструктивных параметров.

5 этап - Определение эксплуатационных параметров роботизированного дорожного катка:

- рабочая скорость машины V_p ;
- рабочая скорость поворота поворотного вальца φ .

6 этап - Анализ полученных значений эксплуатационных параметров.

7 этап - Систематизация полученных данных.

Алгоритм выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров роботизированного дорожного катка представлен на рисунке 5.14.

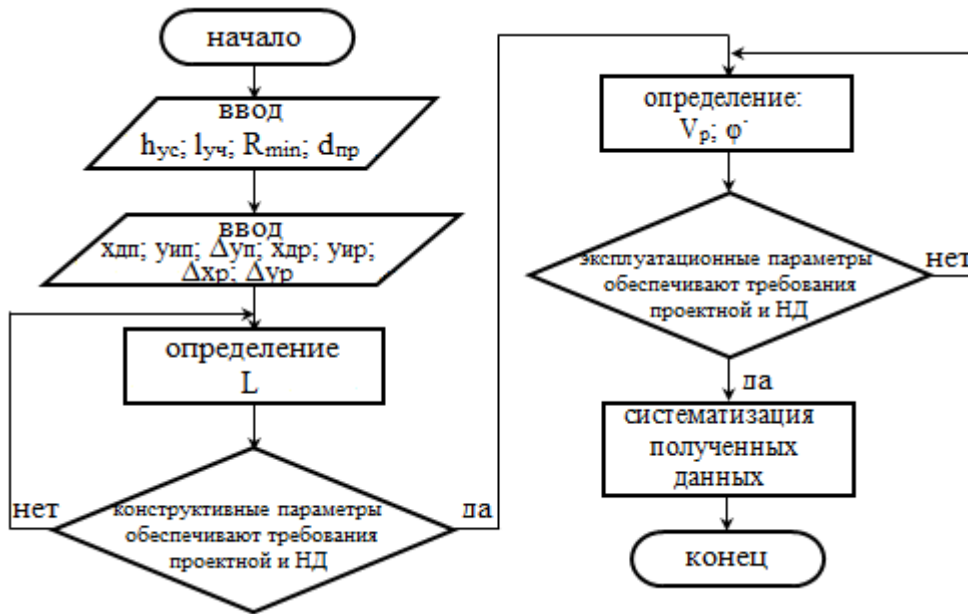


Рисунок 5.14 Алгоритм выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров роботизированного дорожного катка

Предлагаемая методика выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров дорожного катка предусматривает использование математической модели представленной в главе 3. Это не простая задача, требующая от исполнителя определенных компетенций. Поэтому на основе полученных в ходе теоретических исследований функциональных зависимостей была разработана методика выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров дорожного катка, обеспечивающих требуемые параметры траектории движения катка. Методику целесообразно использовать на этапе эскизного проектирования, для определения основных параметров катка влияющих на его маневренность.

Представленные в методике зависимости целесообразно использовать для длины базы в диапазоне 1,5 – 3,5м, скорости поворота поворотного вальца в диапазоне 6 – 18 град/с и скорости катка в диапазоне 2 – 7 км/ч.

Входными параметрами являются:

- база машины, L (м):

а) для двухосных катков – расстояние между центрами продольных осей переднего и заднего вальца;

б) для трехосных катков – расстояние между центром продольной оси заднего (поворотного) вальца и межосевым центром продольных осей передних (ведущих) вальцов.

- скорость поворота поворотного вальца, φ' (град/с);

- скорость катка, V (км/ч).

На первом этапе необходимо задать скорость катка V (км/ч) и по формулам 4.17-4.45 определить коэффициенты $K_{\partial ni, j}$, $K_{y ni, j}$, $K_{\partial pi, j}$, $K_{y pi, j}$, $K_{x pi, j}$ зависящие от скорости движения катка.

На втором этапе, на основании заданной скорости поворота руля φ' (град/с) по формулам 4.6 – 4.16 определить коэффициенты $K_{\partial ni}$, $K_{y ni}$, $K_{\partial pi}$, $K_{y pi}$, $K_{x pi}$, зависящие от скорости поворота руля.

На третьем этапе расчета необходимо задать длину базы L (м), и по формулам 4.1 – 4.5 определить дистанции перестроения $x_{\partial n}$, смещения поворотного вальца при перестроении Δy_n , дистанции разворота $x_{\partial p}$, интервала разворота y_{ip} и смещения поворотного вальца Δx_p при развороте.

Полученные значения параметров, характеризующих траекторию движения дорожного катка сравнить со значениями, заданными в техническом задании на проектирование. Если значения параметров выходят за предел, заданные в техническом задании, то необходимо изменить значение базы, скорости поворота руля и провести повторные расчеты по формулам 4.1 – 4.45.

Выводы по главе

1. Проведенные экспериментальные исследования показали, что разработанная математическая модель сложной динамической системы «рабочая среда – дорожный каток – система управления» с достаточно точностью описывает движения дорожного катка по уплотняемой поверхности в ходе

выполнения маневра. Расхождения результатов теоретических и экспериментальных исследований не превышает 18%.

2. Разработана методика выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров дорожного катка, обеспечивающих требуемые параметры траектории движения катка. Методику целесообразно использовать на этапе эскизного проектирования, для определения основных параметров катка влияющих на его маневренность. Используемые в методике зависимости правомерны для длины базы в диапазоне 1,5 – 3,5м, скорости поворота поворотного вальца в диапазоне 6 – 18 град/с и скорости катка в диапазоне 2 – 7 км/ч.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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.

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 $R^2 = 0,9068$) получать значения параметров характеризующих траекторию движения катка при выполнении маневра перестроения и разворота для длины базы в диапазоне 1,5 – 3,5м, 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 СОКРАЩЕНИЙ

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ГЛОНАСС – Глобальная Навигационная Спутниковая Система;

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

ИМ – исполнительный механизм;

РТК – робототехнический комплекс;

СА – система автопилотирования;

СДУ – система дистанционного управления;

СДМ – строительные дорожные машины;

СКУ – система кооперативного управления;

СТЗ – система технического зрения;

СУ – система управления;

СУОМ – система управления курсом по обозначенному маршруту;

УК – управляющий компьютер;

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;

GPS (Global Positioning System) – система глобального позиционирования.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

L – база машины;

M_D – момент движущих сил;

M_C – момент сопротивления перекачиванию (движению);

G – сила тяжести;

R_B – вертикальная реакция опорной поверхности;

R_T – горизонтальная реакция опорной поверхности;

R_W – сумма сил сопротивления движению;

m – масса;

P_T – сила тяги;

V – скорость;

N – мощность двигателя;

η – КПД трансмиссии;

r – радиус;

ψ ; φ – угол поворота вальца;

O_{II} – мгновенный центр поворота;

x_T ; y_T – координаты текущие;

x_{IIp} ; y_{IIp} – координаты промежуточные;

x_K ; y_K – координаты конечные;

x_P ; y_P – расчетные;

$x_{дп}$ – дистанция перестроения на параллельный курс;

$y_{ин}$ – интервал перестроения на параллельный курс;

Δy_{II} – смещение поворотного вальца при перестроении;

$x_{др}$ – дистанция разворота;

$y_{ир}$ – интервал при развороте;

Δx_p ; Δy_p – смещение поворотного вальца при развороте.

Список используемой литературы

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М. : Наука, 1971. – 283с.
2. Айфичер, Эммануил С. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Эммануил С. Айфичер, Барри У. Джервис. – М. : Вильямс, 2004. – 992 с.
3. Андрейченко, Д.К. Основы работы в среде MATLAB / Д.К. Андрейченко, Ю.В. Чурсов, В.В. Кононов. – Саратов, 2012. – 110 с.
4. Артемьев К.А. / Дорожные машины: В 2х частях. Ч.II. Машины для устройства дорожных покрытий. Учебник для вузов по специальности «Строительные и дорожные машины и оборудование» / К.А.Артемьев, Т.В.Алексеева, В.Г.Белокрылов и др.- М.: Машиностроение, 1982.- 396с., ил.
5. Бабаскин Ю.Г. Технология дорожного строительства: Учеб. пособие по дисц. «Технология дорожного строительства» для студ. спец. 1-36 11 01«Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» / Ю.Г.Бабаскин, И.Н.Вербило. – Мн.: БНТУ, 2003. – 202 с.
6. Баловнев В.И. Обработка и планирование эксперимента при исследовании дорожных машин: Учебное пособие / В.И. Баловнев, Ю.В. Завадский, В.Ю. Мануйлов. – М.: МАДИ, 1983. – 59 с.
7. БЕЛАЗ пресс-центр / Совместная разработка Союзного государства – роботизированный карьерный самосвал БЕЛАЗ грузоподъемностью 136 тонн // URL: www.belaz.by/press/pressrelease/2016/sovместnaja_razrabotka_sojuzno/ (дата обращения 29.05.2017)
8. Бондарева Н.Н. Состояние и перспективы развития роботизации: в мире и России // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2016. Т. 7. №3. С. 49 – 57
9. Вавилов, А. В. Проектирование строительных и дорожных машин : учебно-методическое пособие / А. В. Вавилов, А. А. Котлобай, А. Я. Котлобай. – Минск : БНТУ, 2013. – 392 с.

10. Валекжанин , А.И. Повышение маневренности шарнирно-соединенных мобильных машин в условиях АПК: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01 / А.И. Валекжанин. – Барнаул: 2009. – 181 с.

11. Вахламов В.К./Автомобили: Эксплуатационные свойства: учебник для студ. высш. учеб. заведений// В.К. Вахламов. – 2-е изд., стер.– М.: Издательский центр «Академия», 2006.– 240 с.

12. Вахрушева А.А. Технологии позиционирования в режиме реального времени / Вестник СГУГиТ, Том 22, № 1, 2017 с. 170 - 177

13. Вейцель А.В. / Улучшение характеристик навигационной аппаратуры с использованием будущих перспективных сигналов ГНСС // Вестник СибГАУ №6 2013 с. 42 - 49

14. Волков Д. П. Строительные машины и средства малой механизации: учебник для студ.учреждений сред.проф образования / Д.П. Волков, В.Я. Крикун. 9-е изд., стер. - М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 480 с.

15. Гемуев Ш.Ш., Михайлов Б.Б. / Разработка алгоритма выделения маршрута для мобильного робота // Молодежный научно – технический вестник URL: <http://sntbul.bmstu.ru/dos/763976.html> (дата обращения 10.05.2017)

16. Геодезический приемник ОС – 213 – Orient Systems URL: <https://orsyst.ru/receivers/oc-213> (дата обращения 17.07.2023)

17. Георадар ОКО – 3 автомобильный комплект URL: <https://www.geotech.ru/car/> (дата обращения 17.07.2023)

18. Горелов, В.П. Основы инженерного творчества: учебник для вузов / В.П.Горелов. – Новосибирск : НГАВТ, 2011. – 466 с.

19. Горельшев Н.В. Технология и организация строительства автомобильных дорог : учебник для вузов / Н.В. Горельшев, С.М. Полосин-Никитин, М.С. Коганзон и др.; Под ред. Н.В. Горельшева – М.: Транспорт, 1992 – 551с.

20. ГОСТ Р 54344 – 2011 Техника пожарная. Мобильные робототехнические комплексы для проведения аварийно- спасательных работ и пожаротушения.

Классификация. Общие технические требования. Методы испытаний. - М. : Стандартиформ, 2020. – 28 с.

21. ГОСТ Р ИСО 8373 – 2014 Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. – М. : Стандартиформ, 2015. – 16 с.

22. Гринкевич А.В. Радионавигация: учеб. - метод. пособие / А.В. Гринкевич .- Минск: БГУИР, 2018. – 214 с. : ил.

23. Данилушкин И.А. /Аппаратные средства и программное обеспечение систем промышленной автоматизации. Учебное пособие// И.А. Данилушкин – Самар. Гос. Техн. Ун-т. Самара. 2005. – 168 с.

24. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке:

методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М. : Мир, 1980. – 595 с.

25. Добрынин Д.А., Карпов В.Э. / Моделирование некоторых форм адаптивного поведения интеллектуальных роботов // Информационные технологии и вычислительные системы, №2 2006 с. 45 - 56

26. Дьяков И. Ф. Строительные и дорожные машины и основы автоматизации : учебное пособие / И. Ф. Дьяков; /Ульян. гос. техн. ун-т. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 516 с.

27. Ермолов И.Л., Сонных М.В. Применение технологий искусственного интеллекта для рас-познавания объектов среды функционирования мобильных роботов // Труды Междуна-родной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника". – СПб., 2012.

28. Ефимов В.В. /Управление качеством: Учеб. пособие.- Ульяновск: УлГТУ, 2000. -141 с.

29. Ефремов Е.Ю. Роботизация труда: перспективы и угрозы // Вестник НИБ. 2019. № 37. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/robotizatsiya-truda-perspektivy-i-ugrozy> (дата обращения: 25.03.2022)

30. Жуков Е.А., Ильин С.В. Модернизация дорожного хозяйства России на основе инновационных технологий. Часть 2 // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2017. Т. 8. №3. С. 348 – 356 DOI: 10.18184/2079-4665.2017.8.3.348-356

31. Завражина Т.Г./Датчики: учебное пособие.- Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.- пед. ун-та, 2002. – 87 с.
32. Звонарев С.В. Основы математического моделирования: учебное пособие / С.В. Звонарев. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019.- 112 с.
33. Зюко А.Г. Теория передачи сигналов: Учебник для вузов / ТЗЗ А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, М.В. Назаров, Л.М.Финк. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.: ил.
34. Игнатова О.А./Датчики, применяемые в сенсорной подсистеме информационно-измерительной системы// Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 9.Ч. 2 с. 269 - 278
35. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. Принципы навигации URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/navfag.php> (дата обращения 22.06.2017)
36. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. Системы функциональных дополнений глобальных навигационных спутниковых систем URL: https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/function_dop.php (дата обращения 22.06.2017)
37. КАМАЗ пресс-центр новости / КАМАЗ презентовал уникальную городскую транспортную систему // URL: www.kamaz.ru/press/releases/kamaz_prezentoval_unikalnuyu_gorodskuyu_transportnuyu_sistemu/ (дата обращения 29.05.2017)
38. Коток вибрационный трехосный трехвальцовый ДУ – 107 Руководство по эксплуатации ДУ-107.000.000 РЭ. – Рыбинск. ЗАО «Раскат», 2003 – 55 с.
39. Козлов В. В. Лагранжева механика и сухое трение // Нелинейная динам. – 2010. – Том 6. – № 4. С. 855–868.
40. Козорез Д.А., Кружков Д.М. / Состав и структура автономных систем навигации и управления роботизированного прототипа автомобиля // Спецтехника и связь, №3 2012 с. 15 - 18

41. Козорез Д.А., Кружков Д.М. / Беспилотный комплекс управления низкоманевренным подвижным объектом // Спецтехника и связь, № 5-6 2012 с.24 - 26
42. Колтыгин Д.С., Седельников И.А. / Классификация систем управления робототехническими комплексами // Труды БрГУ. Серия : Естественные и инженерные науки, 2016 Т 1 с. 71 - 73
43. Комченков В.И., Петров В.Ф., Симонов С.Б., Терентьев А.И. / Методика построения роботизированных безэкипажных объектов наземного базирования // Известия ЮФУ. Технические науки, №3 2013 с. 25 - 30
44. Кондрашов Н.А. Исследование и расчет параметров многофункционального катка для уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий: дис. ...канд. техн. наук: 05.05.04 / Н.А. Кондрашов. – Санкт-Петербург: 2016. – 152 с.
45. Корсунский В.А. / Дистанционно управляемые инженерные и дорожные машины // Строительные и дорожные машины, №5 2015 с. 8 - 12
46. Корсунский В.А. Анализ состояния зарубежных и отечественных мобильных робототехнических комплексов наземного базирования, используемых в атомной промышленности // Мир и безопасность. 2004. № 3. с. 30 – 37.
47. Корсунский В.А. Перспективы развития робототехники, предназначенной для применения в чрезвычайных ситуациях // Мир и безопасность. 2009. №3. с. 22-25.
48. Корчагин, П.А. Снижение динамических воздействий на оператора автогрейдера в транспортном режиме : монография / П.А. Корчагин, Е.А. Корчагина, И. А. Чакурин. – Омск : СибАДИ, 2009. – 195 с.
49. Кравченко, О. В. Системы глобального позиционирования в лесном хозяйстве : курс лекций для студентов специальности 1-75 01 01 «Лесное хозяйство» / О. В. Кравченко. – Минск : БГТУ, 2018. – 60 с.

50. Крутов, В.И. Основы научных исследований: Учеб, для техн. вузов/В. И. Крутов, И. М. Грушко, В. В. Попов и др.; Под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. — М.: Высш, шк., 1989. — 400 с.: ил.

51. Кручинин И.Н., Шомин И.И./ Специализированные машины и оборудование для транспортного строительства: Учеб. пособие. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т., 2011.- 157 с.

52. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. –3-е изд., испр. и доп. – М. : Наука, 1973. 208 с. («Теоретическая физика», том I).

53. Лахтина Н.Ю./Техническое обеспечение телематических систем: учеб. пособие. В 6 ч. Ч 3// Н.Ю. Лахтина, К.Г. Манушакян.- М.: МАДИ, 2013. – 52 с.

54. Литвинов А.С., Фаробин Я. Е./Автомобиль: теория эксплуатационных свойств: Учебник для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство».- М.: Машиностроение, 1989.- 240с.: ил.

55. Логвинов В.И., Гальченко Г.А. / Дистанционное управление роботами для экстремальных работ // Наука и современность 2012. Технические науки с. 188 - 201

56. Лысенко В.Д. / Сравнение космической и инерциальной навигации на примере одометра и ГЛОНАСС // Молодой ученый № 8 2016 с. 254 - 256

57. Любченко, Е.А. Планирование и организация эксперимента : учебное пособие / Е.А. Любченко, О.А. Чуднова. – Владивосток : Изд-во ТГЭУ, 2010. – 156 с.

58. Михайлов Б.Б., Назарова А.В., Ющенко А.С./ Автономные мобильные роботы, навигация и управление // Известия ЮФУ, Технические науки, № 2 – 2016 (175) с. 48 - 67

59. Михеев В.В Развитие теории проектирования дорожных катков для энергоэффективного уплотнения грунтов: дис. ...доктора. техн. наук: 05.05.04 / В.В. Михеев. – Омск: 2022. – 386 с.

60. Михеев В.В., Савельев С.В. / Математическая модель уплотнения упруговязкопластичной грунтовой среды при взаимодействии с рабочим органом

дорожной машины в рамках модифицированного подхода сосредоточенных параметров// Вестник СибАДИ, №2 (54) 2017 с. 28 – 36

61. Монаков А.А. Теоретические основы радионавигации: Учеб. пособие / СПбГУАП. СПб., 2002. 70 с.: ил.

62. Носков В.П., Рубцов И.В. Ключевые вопросы создания интеллектуальных мобильных роботов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 3 (15).

63. Остапенко Д.Г., Бошляков А.А. / Учебный мобильный робот для отработки алгоритмов автоматического управления движением на базе шасси для спортивной радиоуправляемой машины // Молодежный научно – технический вестник URL: <http://sntbul.bmstu.ru/dos/593941.html> (дата обращения 05.05.2017)

64. Пелевин Е.Е., Цудиков М.Б./ Экономическая эффективность роботизации различных типов производства // Juvenis scientia. Экономические науки. №6 2017 с.13 – 17

65. Перегудов, Ф.И. Введение в системный анализ : учебное пособие для вузов / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – М. : Высшая школа, 1989. – 360 с.

66. Пермяков В.Б. Технологические машины и комплексы в дорожном строительстве (производственная и техническая эксплуатация): учебное пособие для вузов / В.Б. Пермяков, В.И. Иванов, С.В. Мельник, А.В. Захаренко, В.Н. Кузнецова, Р.Ф. Салихов, Ю.С. Сачук, В.Н. Иванов, А.В. Шапошников, А.И. Злобин, В.В. Дубков, Р.А. Мартюков, С.В. Савельев, К.В. Беляев / Под ред. В.Б. Пермякова.- М.: ИД «БАСТЕТ», 2014 – 752 с.

67. Пермяков, В.Б. Влияние режимных параметров катков на интенсивность уплотнения асфальтобетонных смесей / В.Б. Пермяков, К.В. Беляев // Строительные и дорожные машины (СДМ): ежемесячный научно-технический и производственный журнал = Construction and road building machinery/ ЗАО «Стройдормаш» [и др.]- М. – 2007.- С. 19-22 : ил .- (Исследования) .- ISSN 0039-2391 /- Библиогр.: с. 22 (5 назв).

68. Пермяков, В.Б. Математическая модель уплотнения асфальтобетонных смесей / В.Б. Пермяков, К.В. Беляев // Изв. вузов. Строительство. 2005. № 1 С. 109 – 114.

69. Пиковский М.Я. Дорожные машины и оборудование / Я.М. Пиковский, С.М. Полосин-Никитин, Н.П. Воцинин, В.И. Баловнев М.: Машгиз, 1960. 599 с.

70. Поддубный В.И. / Система управления движением колесного трактора на основе спутниковой навигации // Тракторы и сельхозмашины, №12 2012 с. 19 - 21

71. Польшакова Н.В. / Навигационные системы для сельскохозяйственной техники//Молодой ученый № 4 (63) 2014 с. 432-434

72. Портнова, А.А. Совершенствование рулевого управления автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой: дис. ...канд. техн. наук: 05.05.04 / А.А. Портнова. – Омск: 2015. – 191 с.

73. Правительство Омской области. Официальный портал. Сеть базовых референцных станций высокоточного позиционирования на территории Омской области. URL: <https://omskportal.ru/oiv/mps/otrasl/inftehn/prglonass/refencstan> (дата обращения: 27.03.2022)

74. Прохорова, И.А. Теория систем и системный анализ: учебное пособие / И.А. Прохорова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. –49 с.

75. Реброва И.А. Планирование эксперимента: учебное пособие. – Омск: СиБАДИ, 2010. –105 с.

76. Рогов В.А. Методика и практика технических экспериментов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений /В.А. Рогов, Г.Г. Поздняк. –М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 288 с.

77. Рогова М.В. Датчики электрических систем автоматического управления: учеб. пособие / М.В. Рогова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. 88 с.

78. Романенко И.И. Строительные машины: курс лекций по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» /И.И.Романенко. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 112 с.

79. Савельев С.В. Уплотнение грунтов катками с адаптивными рабочими органами: монография. – Омск: СибАДИ, 2010. – 122 с.

80. Савельев, С.В. Модель взаимодействия рабочего органа вибрационного катка с уплотняемой средой / С.В. Савельев, С.А. Милюшенко, А.Г. Лашко // Механизация строительства 2013. № 1 (823) С. 24 – 28.

81. Самойличенко Е.А., Семунина Н.С. Инерциальная навигация // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/inertsialnaya-navigatsiya> (дата обращения: 28.03.2022)

82. Селиванова Л.М. Инерциальные навигационные системы: учеб. пособие. — Ч. 1: Одноканальные инерциальные навигационные системы / Л.М. Селиванова, Е.В. Шевцова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 46, [2] с. : ил.

83. Сети базовых станций ГЛОНАСС/GPS URL: https://www.gfk-leica.ru/tehnologii/seti_bazovyh_stancii_glonassgps/

84. Солонина, А.И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в среде MATLAB : учебное пособие / А.И. Солонина, С.М. Арбузов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 816 с.

85. СП 78.13330.2012 Автомобильные дороги: Свод правил: Актуализированная редакция СНиП – 3.06.03 – 85: утвержден приказом министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30.06.2012 №272: дата введения 2013-07-01 / ИС ЗАО «СоюздорНИИ».

86. Спинов А.Р., Бекетов А.Ю., Абдулаев З.Я., Кодрян А.И. / Роботизированное транспортное средство на базе автомобиля «Газель» // Вестник МАДИ, №4 2011 с. 215 - 219

87. Старостин А.А./ Технические средства автоматизации и управления: учебное пособие //А.А. Старостин, А.В. Лаптева. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 168 с.

88. Сурков В.О./Снижение влияния условий функционирования на работу навигационной системы подвижного наземного объекта//Молодой ученый. Технические науки №13(117) 2016 – с.222 - 223

89. Сухарев, Р.Ю. Научные основы автономного управления колесными дорожно-строительными машинами: дис. ...доктора. техн. наук: 05.05.04 / Р.Ю. Сухарев. – Омск: 2022. – 290 с.

90. Сырямкин В.И. / Информационные устройства и системы в робототехнике и мехатронике: учебное пособие (Серия: Интеллектуальные технические системы). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2016. – 524 с.

91. Тарасик В.П./Теория движения автомобиля. Учебник для вузов. – СПб. БХВ – Петербург, 2006. – 478 с.: ил.

92. Татур М.М. / Концепция построения системы управления мобильным роботом на платформе серийного мини - трактора «Беларус - 132» // Системный анализ и прикладная информатика, №2 2015 с.43 - 48

93. Тетерина, И.А. Повышение эффективности системы виброзащиты оператора дорожной уборочно-подметальной машины: дис. ...канд. техн. наук: 05.05.04 / И.А. Тетерина. – Омск: 2016. – 201 с.

94. Труфляк Е.В. / Системы параллельного вождения // Е.В. Труфляк. – Краснодар: КубГАУ, 2016 – 72с.

95. Туревский И.С./Теория автомобиля: Учеб. пособие// И.С. Туревский.– М.: Высш. шк., 2005.– 240с.: ил.

96. Умняшкин В.А. Теория автомобиля [Текст] : учеб. пособие / В.А. Умняшкин, Н.М. Филькин, Р.С. Музафаров. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2006. – 272 с.: ил.

97. Уральский федеральный университет/ А.В.Кириллов, Д.П. Степанюк, Н.Д. Ясенев // Электрический привод . Курс лекций: учебное электронное текстовое издание. Екатеринбург – 2016 объем 6,05 уч.-изд.л. Информационный портал <http://www.ustu.ru> URL:

http://study.urfu.ru/Aid/Publication/13509/1/Kirillov_Stepanyuk_Yasenev.pdf (дата обращения 21.08.2017)

98. Фадеев Д.С., Волковский В.В./ Особенности организации труда водителей и оценка их влияния на эффективность работы предприятия// Вестник ИрГТУ. Транспорт. №1 (108) 2016 с. 143 – 151

99. Хархута Н.Я. Дорожные машины. Теория, конструкция и расчет / Под общей ред. Н.Я. Хархуты. Л.: Машиностроение, 1976. 472 с.

100. Хусаинов Н.Ш. / Оценка точности определения местоположения объекта средствами автоматической системы ближней радионавигации с помощью имитационного моделирования // Известия ЮФУ. Технические науки № 4 2008 с. 174 - 178

101. Цой Г.А. /Управление качеством продукции: учебное пособие// Г.А.Цой. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 157с.

102. Чудинов В.А. / Малогабаритный робот для транспортировки инструмента и материалов // Молодой ученый, №23 (103) 2015 с. 266 -267

103. Шацких Е.А./ Факторы влияющие на качество продукции в промышленном производстве//Альманах современной науки и образования. Экономические науки, №12 (90) 2014 – с. 140 - 142

104. Ширяев В.В./Компьютерные измерительные средства (КИС): учебное пособие// В.В. Ширяев – Томск, Изд. ТПУ, 2008. – 190 с.

105. Шишкин Е.А. Рабочий процесс и формирование комплектов дорожных машин для уплотнения асфальтобетонных смесей: дис. ...канд. техн. наук: 05.05.04 / Е.А. Шишкин. – Хабаровск: 2019. – 209 с.

106. Ю р е в и ч Е. И. Сенсорные системы в робототехнике : учеб. пособие / Е. И. Юревич. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 100 с.

107. Юревич Е.И. / Управление роботами и робототехническими системами : учебное пособие // Санкт – Петербург 2000 171с.

108. Юшков В.С. Роботизация строительного-дорожных машин / В.С. Юшков, Е.В. Поезжаева, Л.А. Рыбинская, И.А. Кочуров. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2010. - № 4 (15). – С. 89 – 93. URL: <https://moluch.ru/arhive/15/1382/> (дата обращения: 23.03.2022)

109. AGGEEK Топ-10 автономных роботов для сельского хозяйства URL: <http://aggeek.net/ru/technology/id/top-10-avtonomnyh-robotov-dlja-selskogo-hozjajstva-275/> (дата обращения 25.05.2017)

110. Bing Jiang, A. Mamishev, Robotic Monitoring of Power Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, NO. 3, July 2004 p. 912-018.

111. Bing Jiang, Alanson P. Sample, Ryan M. Wistort and A. V. Mamishev, Autonomous Robotic Monitoring of Underground Cable Systems. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation Niagara Falls, Canada • July 2005. pp.673-679. (http://www.ee.washington.edu/research/seal/pubfiles/ICMA_2005_Proc.pdf)

112. Digma. Цифровые устройства и электроника. Официальный сайт. URL: <https://www.digma.ru/catalog/item/2650> (дата обращения 21.02.2022)

113. Ferreira A., Vassallo R.F., Pereira F.G., Filho T.F.B., Filho M.S. An approach to avoid obstacles in mobile robot navigation: the tangential escape // Controle y Automacao. 2008. V. 19. N 4. P. 395–405.

114. Fierro R., Lewis F.L. Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks // Neural Netw. IEEE Trans. On. 1998. V. 9. № 4. pp. 589–600

115. Janglová D. Neural networks in mobile robot motion // Cut. Edge Robot. 2005. V. 1. № 1. pp. 243–254.

116. John Deere /Системы точного земледелия AMS// Руководство и автоматизация Auto Trac Universal URL: https://m/deere.ru/ru_RU/products/equipment/agricultural_management_solutions/guidance_and_machine_control/autotrac_universal_200/autotrac_universal_200/.page? (дата обращения 16.08.2017)

117. John Deere/Приемник Star Fire 6000 URL: https://deere.ru/ru_RU/products/equipment/agricultural_management_solutions/displays_and_receivers/starfire_6000_receivers/starfire_6000_receivers.page? (дата обращения 20.08.2017)

118. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // International Journal of Robotics Research. 1986. V. 5. N 1. P. 90–98.

119. Kristensen S, Horstmann S., Klandt J., Lohner F., and Stopp A. Human-friendly interaction for learning and cooperation // Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, 2001. IEEE. – P. 2590-2595.

120 M. Nayyerloo, XiaoQi Chen, Wenhui Wang, and J .G. Chase, Cable-Climbing Robots for Power Transmission Lines Inspection. <http://www.intechopen.com/books/mobile-robots-state-of-the-art-in-land-sea-air-and-collaborative-missions/cable-climbing-robots-for-power-transmission-lines-inspection>.

121. MT system /Новый магниторезистивный датчик угла КМА 220 компании NXP Semiconductors URL: <http://mt-system/ru/news/nxp-semiconductors/novyj-magnitorezistivnyj-datchik-ugla-kma220-kompanii-nxp-semiconductors> (дата обращения 23.08.2017)

122. Thrun, S. FastSLAM: An Efficient Solution to the Simultaneous Localization And Mapping Problem with Unknown Data Association / S. Thrun [et al.] // Journal of Machine Learning Research, 2004.

Приложение А
(справочное)

**Экономическое обоснование целесообразности создания
роботизированных строительных машин**

Главной задачей роботизации дорожного строительства является создание производственных систем нового типа, обоснованиями целесообразности которых, будут являться:

- улучшение условий труда человека;
- повышение качества продукции;
- снижение эксплуатационных расходов;
- повышение производительности.

Что, в конечном счете, приведет к снижению себестоимости производимых работ, продукции (рисунок 1).



Рисунок 1- Влияние критериев эффективности на себестоимость работ дорожного строительства

Ключевым элементом в системе дорожного строительства является человек. Использование труда человека регулируется и регламентируется различными законодательными, нормативными и правовыми актами, основными из которых являются Конституция Российской Федерации, Трудовой Кодекс Российской Федерации и др.

В связи с этим, в виду физиологических особенностей человеческого организма, на использование труда человека накладываются некоторые ограничения и предъявляются определенные требования. Что в свою очередь в значительной мере влияет на эффективность производства.

Из основных ограничений и требований можно выделить:

- ограничение еженедельной продолжительности рабочего времени;
- ограничение продолжительности ежедневной работы (смены);
- ограничение еженедельной продолжительности работы накануне нерабочих, праздничных дней;
- ограничения работы в ночное время;
- перерывы для отдыха, питания, обогрева и т.д. в течение рабочего дня (смены);
- предоставление выходных дней;
- предоставление ежегодных оплачиваемых отпусков;
- предоставление отпусков без сохранения заработной платы;
- оплата и нормирование труда;
- полный запрет или частичное ограничение на использование труда человека в некоторых случаях. И т.д. Что отражено в требованиях «Трудового кодекса Российской Федерации» от 30.12.2001г. № 197 ФЗ и Приказе от 02.02.2017г. № 129н «Об утверждении правил по охране труда при производстве дорожных строительных и ремонтно-строительных работ» Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации.

Один из вариантов роботизации дорожного строительства представляет собой замену труда человека – водителя (оператора, машиниста) управляющего СДМ на роботизацию системы управления СДМ. Это позволит исключить человека из процесса управления техникой, даст возможность разделить систему человек – машина, т.е. сделает применение СДМ независимым от ограничений и требований, предъявляемых к труду человека, сократит число привлекаемых специалистов и др.

Эксплуатация СДМ при строительстве и проведении других дорожных работ оказывает на работников воздействие различных опасных и (или) неблагоприятных факторов. К ним относятся:

- движущиеся транспортные средства, дорожная техника, грузоподъемные машины и механизмы и др.;
- острые кромки, заусенцы и шероховатости на поверхности машин, инструмента и т.п.;
- подвижные части рабочих органов СДМ технологического оборудования, инструмента и пр.;
- падающие предметы (элементы технологического оборудования), инструмент, материалы;
- повышенная запыленность, загазованность воздуха рабочей зоны;
- повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны, поверхностей оборудования, материалов;
- повышенные уровни шума и вибрации на рабочем месте;
- повышенная или пониженная подвижность воздуха;
- повышенная или пониженная влажность воздуха;
- недостаточная освещенность рабочей зоны;
- повышенное значение напряжения в электрической цепи;
- повышенный уровень электромагнитных излучений;
- расположение рабочих мест на значительной высоте относительно поверхности земли (пола);
- физические перегрузки;
- нервно-психические перегрузки.

Контроль оператором за работой роботизированных СДМ (группы, комплекта СДМ) из вне рабочей зоны (возможно за пределами строительной площадки) исключит воздействие данных факторов на человека, либо значительно их снизит, что позитивно скажется на условиях труда.

Улучшение условий труда, в свою очередь, повышает работоспособность, снижает утомляемость, вероятность ошибки, брака.

Кроме того, сокращение привлекаемого персонала (специалистов), позволит более качественно решать социальные задачи, непосредственно влияющие на качество продукции, к которым относятся:

- подбор, расстановка и перемещение кадров;
- повышение квалификации (обучение) специалистов;
- взаимоотношения в коллективе;
- мотивация персонала;
- социально – бытовое обслуживание и др. [28, 101, 103].

Не менее значимым способом снижения себестоимости работ дорожного строительства является сокращение эксплуатационных расходов применяемых СДМ.

В приказе Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 20.12.2016г. № 999/пр. установлена «Методика определения сметных цен на эксплуатацию машин и механизмов». Постатейная структура сметных цен на эксплуатацию машин ($C_{\text{маш}}$) включает следующие нормативные показатели:

$$C_{\text{маш}} = A + P + B + Z + ГСМ + П, \quad (\text{А.1})$$

где:

- A – нормативный показатель амортизационных отчислений на полное восстановление, руб./маш.-ч;
- P – нормативный показатель затрат на выполнение всех видов ремонтов, технического обслуживания и т.д., руб./маш.-ч;
- B – нормативный показатель затрат на замену быстроизнашивающихся частей, руб./маш.-ч;
- Z – нормативный показатель затрат на оплату труда рабочих управляющих машинами (водителей, операторов, машинистов), руб./маш.-ч;
- $ГСМ$ – нормативный показатель затрат на энергоносители, смазочные материалы, гидравлическую и охлаждающую жидкости (горюче-смазочные материалы), руб./маш.-ч;
- $П$ – нормативный показатель затрат на перебазировку, руб./маш.-ч.

Количество специалистов задействованных в управлении и обеспечивающих эксплуатацию строительных машин, их квалификационные разряды устанавливаются на основании инструкций по эксплуатации СДМ, профессиональных стандартов, действующих единых и ведомственных норм и расценок на строительные, монтажные, ремонтно-строительные работы (ЕНиР, ВНиР), единого тарифно-квалификационного справочника работ и профессий рабочих (ЕТКС) и т.д.

В таблице на рисунке 2 выборочно приведены наименования некоторых профессий рабочих, задействованных в управлении и обслуживании СДМ и значения их тарифных разрядов.

Наименование профессий	Тарифные разряды
1. Машинисты автогрейдеров мощностью:	
- более 200 л.с. – до 240 л.с. (исключительно)	8
- 240 л.с и более	9
2. Машинист бульдозеров мощностью:	
- 285 л.с – 384 л.с.	8
- 385 л.с. и более	9
3. Машинисты профилировщиков:	
- землеройно-фрезерных мощностью 170 л.с. и более для скоростного строительства автомобильных дорог	8
- входящих в комплекс машин типа ДС-100 и ДС-110	9
4. Машинисты скреперов самоходных мощностью:	
- от 160 л.с. до 360 л.с.	8
- от 375 л.с. до 720 л.с.	9
- от 850 л.с и более	10

и т.д.

Рисунок 2 - Наименование профессий рабочих, задействованных в управлении и обслуживании строительными дорожными машинами и значения соответствующих тарифных разрядов

Показатель затрат труда специалистов управляющих машиной устанавливается в человеко-часах (*чел.-ч*) в расчете на 1 *маш.-ч* рабочего времени машины. Нормативный показатель затрат на оплату труда рабочих управляющих машинами (3), являющийся структурным элементом (А.1), определяется как:

$$З = \sum (З_p \times t_{pm}), \quad (A.2)$$

где:

$З_p$ – показатель часовой оплаты труда специалиста данного тарифного разряда (устанавливается на определенную дату федеральной государственной информационной системой ценообразования в строительстве) *руб./чел.-ч*.

t_{pm} – затраты труда специалистов управляющих машиной, данного квалификационного разряда, *чел.-ч/маш.-ч*.

Таким образом, сметная цена на эксплуатацию СДМ в том числе напрямую зависит от затрат на оплату труда специалистов задействованных в управлении и обслуживании машины (их количества, квалификационных разрядов, затрат труда (t_{pm}) и пр.).

Для примера приведена сметная стоимость выполнения некоторых работ дорожными катками по устройству дорожных оснований и покрытий в текущем уровне цен на 2023 год установленная Федеральными Единичными Расценками, а так же предполагаемая экономическая выгода от исключения из цены затрат на оплату труда оператора катка.

ФЕР27-04-001-01 Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из песка:

- сметная стоимость на 100 м³ всего – 37470 рублей;
- в том числе оплата труда механизатора – 3373 рубля.

Экономия – 3373 рубля.

ФЕР27-04-001-04 Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из щебня:

- сметная стоимость на 100 м³ всего – 33051 рублей;

- в том числе оплата труда механизатора – 2812 рублей.

Экономия – 2812 рублей.

Кроме того, необходимо учесть такие расходы, как различные премиальные выплаты, налоговые отчисления и взносы на каждого работника. К которым относятся взносы в:

- ПФР (Пенсионный фонд России);
 - ФФОМС (Федеральный фонд обязательного медицинского страхования);
 - ФСС (Фонд социального страхования);
- и другие.

Учитывая тот факт, что эксплуатация СДМ в настоящее время не возможна без привлечения большого количества специалистов, можно сделать вывод о том, что затраты на оплату их труда в значительной мере влияют на конечный результат себестоимости строительства автомобильных дорог. Сокращение персонала за счет роботизации СДМ соответственно приведет к снижению затрат.

Не менее важным фактором, влияющим на себестоимость строительства, является производительность СДМ.

Производительность – это объем работы, количество продукции, выполненной, произведенной в единицу времени, выраженной в соответствующих единицах измерения (длина, площадь, масса, объем и т.д.).

В виду того, что производительность зависит от широкого ряда факторов (условия, организация работ, технология выполнения операций, квалификация исполнителей, конструктивные особенности СДМ пр.), различают три вида производительности:

- конструктивная (расчетная);
- техническая;
- эксплуатационная [51, 66].

Конструктивная производительность $P_{кн}$ является максимально возможной для конкретных условий эксплуатации, при номинальной загрузке СДМ и правильной организации рабочего процесса. Зависит от конструктивных

особенностей машины, ее рабочих органов и не учитывает потери энергии и времени.

Для машин циклического действия:

$$P_{кн} = V_p / T_{ц} (M^3/ч) \text{ или } P_{кн} = V_p \rho / T_{ц} (т/ч), \quad (A.3)$$

где:

V_p – расчетный объем материала, перерабатываемый за один цикл работы (M^3);

$T_{ц}$ – продолжительность рабочего цикла машины (ч);

ρ – плотность материала, ($т/M^3$).

Для СДМ непрерывного действия

$$P_{кн} = 3600 B v_p (M^2/ч) \text{ или } P_{кн} = 3600 F_p v_p (M^3/ч), \quad (A.4)$$

где:

B – ширина захвата рабочего органа машины (м);

v_p – расчетная скорость перемещения машины (материала) (м/с);

F_p – расчетное сечение потока материала (M^2).

Техническая производительность P_{mx} – максимальная производительность для данных условий проведения работ, учитывающая потери и изменения структуры материала (уплотнение, разрыхление), снижение скоростей, эффективной мощности, технологические перерывы и т.д.

$$P_{mx} = P_{кн} \kappa_1 \kappa_2 \dots \kappa_i, \quad (A.5)$$

где κ_i – коэффициенты учета потерь, $\kappa_i < 1$.

Эксплуатационная производительность (P) является наиболее близкой к фактической. Она учитывает потери рабочего времени машины связанные с холостыми перемещениями, техническим обслуживанием, ремонтом, технологическими, организационными и другими перерывами.

$$P = P_{mx} \kappa_{в}, \quad (A.6)$$

где $\kappa_{в}$ – коэффициент использования рабочего времени, $\kappa_{в} = 0,80 \dots 0,85$ [51].

При расчетах сменной эксплуатационной производительности ($P_{см}$) учитывают количество часов работы СДМ в течение смены

$$P_{см} = T_{см} P_{mx} \kappa_{в(см)}, \quad (A.7)$$

где:

$T_{см}$ – продолжительность рабочей смены (ψ);

$\kappa_{в(см)}$ – коэффициент использования рабочего времени машины в течение смены, $\kappa_{в(см)} < 1$.

Коэффициент использования рабочего времени машины $\kappa_{в}$ ($\kappa_{в(см)}$) в общем случае выражается как отношение рабочего времени машины к суммарным затратам времени

$$\kappa_{в} = t_p / (t_p + t_n + t_{nm} + t_{no}) \quad (A.8)$$

где:

t_p – чистое время работы машины;

t_n – общее время всех перерывов в работе;

t_{nm} – время затраченное на холостые переезды машины;

t_{no} – время затраченное на подготовительные операции [66].

Чтобы дать оценку эффективности использования машины, применяют коэффициент использования машины по производительности

$$\kappa_n = Pф / Pп, \quad (A.9)$$

где $Pф$ – производительность фактическая; $Pп$ – производительность плановая. [66]

Таким образом, сокращение числа перерывов в работе приведет к возрастанию коэффициента использования рабочего времени машины $\kappa_{в}$ ($\kappa_{в(см)}$). Это, наряду с увеличением времени продолжительности рабочей смены $T_{см}$ окажет влияние на рост эксплуатационной производительности (производительности фактической), рост эффективности использования СДМ. Что возможно в случае замены труда человека роботизированной системой управления СДМ.

В виду того, что увеличение производительности есть увеличение количества продукции (работы) произведенной в единицу времени, соответственно происходит сокращение затрат труда $t_{рм}$ (1.2.) в расчете на

единицу продукции, что влечет за собой сокращение удельного веса заработной платы в структуре себестоимости.

Приложение Б
(справочное)

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный конструктор
ООО «Завод «Дорожных машин»



М.А. Шанов

«31» мая 2023 г.

АКТ

внедрения методики выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров дорожного катка, обеспечивающих требуемые параметры траектории движения катка

ООО «Завод «Дорожных машин» г.Рыбинск принял к использованию методику для расчета основных конструктивных и эксплуатационных параметров дорожного катка, разработанную в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» соискателем Артеменко М.Н.

Методика позволяет обоснованно выбирать конструктивные и эксплуатационные параметры дорожного катка, обеспечивающие его движение по требуемым траекториям, с заданной точностью. Применение методики и разработанной на основании нее программы позволяет снизить затраты времени на выбор конструктивных и эксплуатационных параметров дорожного катка (скорость катка, скорость поворота и угол поворота поворотного вальца, радиус поворота, дистанцию нерастрессия, длину базы, диаметр вальца).

Приложение В
(справочное)

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по образовательной
деятельности ФГБОУ ВО «СибАДИ»
Д.т.н., проф. Кузнецова В.Н.



«28» _____ 2023 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы Артеменко М.Н. по теме
«Повышение маневренности роботизированного дорожного катка» в учебный
процесс

Настоящим актом подтверждается внедрение в учебный процесс, осуществляемый в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» на кафедре «Автоматизация и энергетическое машиностроение» результатов диссертационной работы Артеменко М.Н. в качестве разделов курсов дисциплин «Автоматизация транспортно-технологических машин», «Автоматизация и компьютеризация транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования», «Эксплуатация систем управления транспортно-технологических машин и оборудования», в том числе методики выбора основных конструктивных и эксплуатационных параметров дорожного катка, обеспечивающих требуемые параметры траектории его движения.

Указанные дисциплины изучаются студентами, обучающимися по направлениям подготовки 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»

Заведующий кафедрой «Автоматизация
и энергетическое машиностроение»,
к.т.н., доцент

Р.Ю. Сухарев