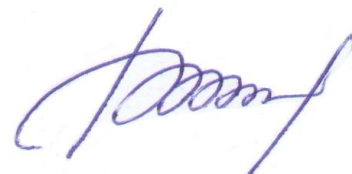


Министерство науки и высшего образования РФ

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

На правах рукописи



Сухарев Роман Юрьевич

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ
КОЛЕСНЫМИ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫМИ МАШИНАМИ**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
доктора технических наук

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ:
доктор технических наук, профессор
Корчагин Павел Александрович

Омск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	13
1.1. Концепция автономного управления дорожно-строительными машинами.....	13
1.2. Анализ предшествующих исследований	18
1.3. Анализ теорий копания грунта	21
1.4. Анализ математических моделей микрорельефа.....	28
1.5. Анализ и классификация систем управления дорожно-строительными машинами.....	34
1.6. Методика оценки эффективности работы автономных дорожно-строительных машин	45
1.7. Принципы формирования информационных параметров на основе сигналов глобальных навигационных спутниковых систем	52
1.8. Цель и задачи исследования.....	58
ГЛАВА 2. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ	61
2.1. Методика теоретических исследований	61
2.2. Методика экспериментальных исследований	67
2.3. Структура работы.....	70
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ.....	72
3.1. Система отсчета перемещений дорожно-строительной машины	72
3.2. Обоснование расчетной схемы автогрейдера.....	73
3.3. Обоснование расчетной схемы фронтального погрузчика	78
3.4. Уравнения геометрических связей динамической системы колесной дорожно-строительной машины.....	83
3.5. Математическое описание динамической системы методом дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода	88
3.6. Математическая модель микрорельефа	94
3.7. Математическая модель взаимодействия рабочего органа с грунтом	97
3.8. Кинематика процесса поворота колесной дорожно-строительной машины.....	100
3.9. Динамика процесса поворота колесной дорожно-строительной машины.....	106
3.10. Математическая модель гидропривода.....	113

3.11. Математическая модель силовой установки	119
3.12. Выводы по третьей главе	124
ГЛАВА 4. МЕТОДОЛОГИЯ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫМИ МАШИНАМИ.....	126
4.1. Анализ рабочего процесса дорожно-строительной машины	126
4.2. Метод построения траектории колесной дорожно-строительной машины.....	130
4.3. Вектор состояния машины	137
4.4. Методы управления курсом движения дорожно-строительной машины.....	146
4.5. Подсистема управления рабочим органом	159
4.6. Выводы по четвертой главе	162
ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	163
5.1. Теоретические исследования математических моделей поворота.....	163
5.2. Теоретические исследования метода «чистое преследование» (Pure Pursuit).....	168
5.3. Теоретические исследования метода Стэнли (Stanley)	183
5.4. Теоретические исследования копирного метода управления	190
5.5. Сравнение эффективности методов	232
5.6. Теоретические исследования копирного метода управления при расположении рабочего органа перед базой машины	235
5.7. Выводы по пятой главе	247
ГЛАВА 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ.....	249
6.1. Экспериментальное подтверждение адекватности математической модели.....	249
6.2. Практические рекомендации и технические решения	253
6.3. Выводы по шестой главе	261
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	262
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	266
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	267
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	271
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	296

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Строительство автомобильных дорог – это сложный, многоэтапный процесс. При строительстве применяется большой парк колесных дорожно-строительных машин (ДСМ). Стоимость строительства дорог в России связана с применением ручного труда и достаточно высока. Одним из путей ее снижения является повышение эффективности ДСМ.

Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года предполагает развитие скоростных и высокоскоростных путей сообщения – автомагистралей 1 категории. К строительству дорог данной категории применяются самые высокие требования по точности. Выполнение данных требований сопряжено с большими трудностями в виду ограниченной точности самой ДСМ, отсутствия бортовых систем контроля и ограниченных возможностей человека-оператора (ЧО), который не в состоянии «на глаз» определить требуемые точностные параметры возводимого сооружения. Одновременное слежение за положением рабочего органа (РО), курсом движения и скоростью машины приводят к снижению качества выполняемых работ, увеличению числа исправлений.

Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года в разделе «Транспортные и космические системы» ставит актуальную задачу – снижение затрат, повышение эффективности строительства и содержания объектов инфраструктуры, рост производительности труда.

Для решения поставленных актуальных задач целесообразно применять современные системы управления (СУ) ДСМ, которые берут на себя заботу о соблюдении требований, предъявляемых к возводимому сооружению.

На сегодняшний день на рынке представлено некоторое количество СУ иностранного производства, функционирующих на различных принципах, выполненных на схожей элементной базе. Однако данные СУ осуществляют управление только РО ДСМ, в то время как курсом движения и скоростью продолжает управлять ЧО.

Развитие микропроцессорной и компьютерной техники, приборов и средств контроля и измерения в последнее время дает большое поле для совершенствования существующих СУ и создания принципиально новых систем автономного управления ДСМ, исключающих участие ЧО в рабочем процессе ДСМ.

Применение подобных систем автономного управления ДСМ позволит снизить долю ручного труда на всех этапах строительства и ремонта, от геодезических изысканий до приемо-сдаточных работ, снизить количество исправлений и доделок, снизить себестоимость производства работ и осуществлять проектирование и строительство дорог с использованием BIM-технологий, что приводит к появлению «цифрового двойника» возводимого объекта, который можно использовать на протяжении всего жизненного цикла.

Однако в настоящее время отсутствуют необходимые научные основы для создания новых систем автономного управления отечественного производства. Таким образом, актуальным направлением исследований является разработка методологии автономного управления ДСМ для создания перспективных систем управления, которые позволят осуществлять рабочий процесс ДСМ без участия ЧО.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в развитие вопросов эффективного управления ДСМ внесли разработки отечественных ученых Т.В. Алексеевой, В.Ф. Амельченко, В.И. Баловнева, А.М. Васьковского, В.С. Дегтярева, В.П. Денисова, Ю.М. Княжева, Б.Д. Кононыхина, П.А. Корчагина, Э.Н. Кузина, Е.Ю. Малиновского, В.А. Мещерякова, В.Н. Тарасова, Н.А. Ульянова, А.М. Холодова, В.С. Щербакова и др. Вопросами оптимального управления сельскохозяйственными машинами занимались такие ученые как Калоев А.В., Поддубный В.И. и др. Вопросами управления мобильными роботами и автомобилями занимались зарубежные ученые О. Amidi, R.C. Coulter, O. Ringhdal, M.J. Barton, J.M. Snider, Y. Wu, Z. Xie, Y. Lu, K. Fue, W. Porter, E. Barnes, C. Li, G. Rains и др.

На основании вышеизложенного были сформулированы научная гипотеза, цель, объект, предмет и задачи исследования.

Научная гипотеза состоит в том, что разработка научных основ и методов автономного управления колесными ДСМ позволит создать принципиально новый класс систем автономного управления и повысить эффективность работы колесных ДСМ.

Цель работы: решение научной проблемы повышения эффективности работы колесных ДСМ путем разработки научных основ и методов автономного управления.

Объект исследования: рабочий процесс формирования земляного сооружения колесной ДСМ, оснащенной системой автономного управления.

Предмет исследования: закономерности, устанавливающие связь между конструктивными и эксплуатационными параметрами колесной ДСМ, параметрами системы автономного управления и критерием эффективности.

Задачи исследования:

1. Предложить концепцию автономного управления колесными ДСМ на основе классификации ДСМ, анализа рабочего процесса и идентификации функций ЧО.
2. Провести классификацию существующих СУ ДСМ и определить перспективы создания систем нового класса.
3. Предложить методику оценки эффективности работы колесной ДСМ, оснащенной системой автономного управления.
4. Разработать математическую модель сложной динамической системы рабочего процесса колесной ДСМ, оснащенной системой автономного управления, позволяющую моделировать требуемые траектории движения ДСМ при формировании земляного полотна с различным расположением РО.
5. Разработать методологию автономного управления и построения траекторий движения с учетом кинематических ограничений колесных ДСМ.

6. Установить зависимости между конструктивными, эксплуатационными параметрами ДСМ, параметрами системы автономного управления и критерием эффективности при формировании земляного полотна колесной ДСМ.

7. Сформулировать практические рекомендации и технические решения для создания перспективных систем автономного управления колесными ДСМ на основе обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна:

1. Предложена концепция автономного управления колесными ДСМ, идентифицированы функции, которые должна выполнять перспективная система автономного управления, разработана блок-схема рабочего процесса ДСМ с перспективной системой автономного управления.

2. Предложена классификация существующих систем управления ДСМ на основе идентификации функций управления, в которую добавлен класс перспективных систем автономного управления.

3. Разработана математическая модель сложной динамической системы рабочего процесса ДСМ, включающая в себя подсистемы: микрорельеф, базовая машина, РО – обрабатываемая среда, гидропривод РО, гидропривод рулевого управления (ГРУ), ходовое оборудование (ХО), силовая установка и система автономного управления, позволяющая моделировать требуемые траектории движения ДСМ при формировании земляного полотна с различным расположением РО относительно базы машины.

4. Разработан метод построения траектории движения, учитывающий кинематические ограничения колесных ДСМ.

5. Научно обоснован термин «вектор состояния ДСМ», представляющий собой вектор координат ДСМ и ее частей, необходимых и достаточных для информационного обеспечения методологии автономного управления колесными ДСМ.

6. Проведена модификация метода «чистое преследование» путем введения нового параметра – скорости. Получена новая функциональная зависимость

оптимальных значений параметра «дальность видимости» от конструктивных и эксплуатационных параметров колесной ДСМ ($L_0 = a_0 \cdot V + a_1$), что позволило повысить точность метода при управлении колесной ДСМ.

7. Проведена адаптация метода «Стэнли» для управления колесной ДСМ. Получена новая функциональная зависимость оптимальных значений коэффициента усиления метода «Стэнли» от конструктивных и эксплуатационных параметров колесной ДСМ ($k = -349,9 + 582,3 \cdot K_{\sigma} + 58,98 \cdot L$).

8. 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». Получены функциональные зависимости оптимальных значений параметров разработанного копирного метода управления от конструктивных и эксплуатационных параметров колесной ДСМ ($k_v = V^5(1,7856 + 1,085 \cdot K_{\sigma} - 0,1308 \cdot L) + (1,247 - 0,7772 \cdot K_{\sigma} + 0,1154 \cdot L)$, $L_0 = 1,77 \cdot V + (3,55 - 8,2 \cdot K_{\sigma} + 0,71 \cdot L)$).

Теоретическая и практическая значимость работы состоит:

- в предложенной классификации существующих систем управления ДСМ на основе идентификации функций управления, в которую введен новый класс систем автономного управления;

- в разработанном методе построения траектории движения ДСМ, учитывающем кинематические ограничения колесных ДСМ, координаты путевых точек и азимуты направления дальнейшего движения ДСМ и созданной на его базе программе для ЭВМ «Модуль построения траектории движения дорожно-строительной машины» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022612587);

- в разработанном методе моделирования трехмерного микрорельефа для теоретических исследований ДСМ и созданной на его базе программе для ЭВМ «Модуль генерации трехмерного микрорельефа для теоретических исследований дорожно-строительных машин» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022612332);

- в разработанном копирном методе управления ДСМ, учитывающем конструктивные и эксплуатационные параметры ДСМ;
- в модифицированном методе «чистое преследование», в который введен дополнительный параметр – скорость, что позволило значительно улучшить значения критерия эффективности при увеличении скорости машины;
- в адаптированном для управления ДСМ методе «Стэнли»;
- в практических рекомендациях и технических решениях по созданию перспективных систем автономного управления колесными ДСМ, включающих в себя: разработанную двухуровневую структурную схему, инженерную методику по созданию перспективных систем автономного управления ДСМ и вариант комплекта аппаратуры для технической реализации (акт внедрения в АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» от 12.05.2022).

Методология и методы исследований носят комплексный характер, содержат как теоретические, так и экспериментальные исследования. Задачами теоретических исследований являлось выявление основных закономерностей, связывающих принятый критерий эффективности и параметры системы управления ДСМ. Задачами экспериментальных исследований являлось подтверждение адекватности математической модели рабочего процесса ДСМ; определение численных значений параметров, необходимых для расчета коэффициентов математических моделей. При экспериментальных исследованиях использовался метод как активного, так и пассивного эксперимента.

Реализация результатов работы. Результаты работы приняты к внедрению в АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» для разработки перспективных систем автономного управления ДСМ. Результаты используются в учебном процессе Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ).

Положения, выносимые на защиту:

- концепция автономного управления колесными ДСМ и предложенная классификация СУ;

- методика оценки эффективности рабочего процесса колесной ДСМ, оснащенной системой автономного управления;
- математическая модель сложной динамической системы рабочего процесса колесной ДСМ, состоящая из подсистем: микрорельеф – ХО, базовая машина, РО – обрабатываемая среда, гидропривод РО, ГРУ, силовая установка, СУ, позволяющая моделировать требуемые траектории движения колесной ДСМ при формировании земляного полотна с различным расположением РО;
- блок-схемы рабочего процесса ДСМ с современными СУ и ДСМ с перспективной системой автономного управления;
- метод моделирования трехмерного микрорельефа для теоретических исследований рабочего процесса ДСМ;
- метод построения траектории движения, учитывающий конструктивные ограничения колесных ДСМ;
- предложенное понятие «вектор состояния ДСМ» и варианты комплекта измерительной аппаратуры для его реализации;
- модернизированный метод управления «чистое преследование», результаты его теоретических исследований и найденные функциональные зависимости оптимальных параметров метода «чистое преследование» от конструктивных и эксплуатационных параметров ДСМ;
- адаптированный для управления колесной ДСМ метод «Стэнли», результаты его теоретических исследований и найденные функциональные зависимости оптимальных параметров метода Стэнли от конструктивных и эксплуатационных параметров ДСМ;
- новый копирный метод управления, результаты его теоретических исследований и найденные функциональные зависимости оптимальных параметров метода управления от конструктивных и эксплуатационных параметров ДСМ;
- результаты экспериментальных исследований;
- практические рекомендации и технические решения для создания перспективных систем автономного управления колесными ДСМ, включающие в

себя: разработанную двухуровневую структурную схему, инженерную методику создания перспективных систем автономного управления дорожно-строительными машинами и вариант технической реализации.

Степень достоверности научных положений обеспечивается корректностью принятых допущений, адекватностью математических моделей, корректным использованием методов имитационного моделирования и достаточным объемом экспериментальных данных.

Апробация результатов работы. Основные положения работы докладывались и получили одобрение на: Международной научно-практической конференции «Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки» (г. Омск, СибАДИ, 2014 г.), Международной научно-практической конференции «Архитектура, строительство, транспорт» (г. Омск, СибАДИ, 2015 г.), Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Фундаментальные и прикладные науки - основа современной инновационной системы» (г. Омск, СибАДИ, 2015 г.), 9-й всероссийской научно-практической конференции «Управление качеством образования, продукции и окружающей среды» (г. Бийск, АлтГТУ, 2015 г.), Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2021» (г. Владивосток, ДВФУ, 2021 г.), V Национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство» (г. Омск, СибАДИ, 2022 г.), VII Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» (г. Омск, СибАДИ, 2022 г.).

Личный вклад автора состоит в постановке и решении крупной научной проблемы автономного управления ДСМ, имеющей важное хозяйственное значение, решение которой вносит значительный вклад в развитие экономики страны. В разработке новых и модернизации существующих методов автономного управления машинами. В разработке алгоритма построения

траектории движения машины с учетом конструктивных особенностей и ограничений. В разработанной концепции, структурной схеме, инженерной методике и предложенном варианте технической реализации перспективных систем автономного управления ДСМ.

Соискателем получены новые научные результаты, направленные на достижение показателей, которые определены «Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» и «Прогнозом научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года».

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертационной работы соответствует области исследования паспорта научной специальности 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»).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 25 печатных работ, в том числе 12 статей в изданиях из списка ВАК, 1 статья в журнале, входящем в Scopus, 4 монографии. Получены 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, основных результатов и выводов, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет в целом 295 страниц основного текста, в том числе 51 таблица, 190 рисунков, список литературы из 252 наименований и приложений на 24 страницах.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Концепция автономного управления дорожно-строительными машинами

В зависимости от выполняемых функций ДСМ разделяют на группы [58,59,85,86,87,130,134,186,188,219,246]:

1) Машины для подготовительных работ (сюда относят машины для предварительной подготовки площадки к проведению строительных работ);

2) Землеройные машины:

а) **бульдозеры** – предназначены для резания и перемещения грунта, а также для планировки поверхности строительной площадки;

б) **экскаваторы** – машины, предназначенные для копания и перемещения грунта на малые расстояния (до 10-15 м);

в) **грейдеры и автогрейдеры** – машины, применяемые в дорожном строительстве для планировки дорожного основания и возведения земляного полотна;

г) **скреперы** – предназначены для послойного срезания и перемещения грунта на расстояние до 5 км;

3) Машины для укладки и обслуживания дорожных покрытий:

а) **дорожные фрезы** – машины для удаления верхнего слоя дорожных покрытий;

б) **асфальтоукладчики** – машины для укладки слоёв асфальтобетонного покрытия;

в) **катки** – машины для утрамбовки и уплотнения грунта, асфальта и т.д.

4) Машины для производства и транспортирования бетонных смесей;

5) Дробильно-сортировочное оборудование;

6) Машины для свайных работ;

7) Машины и оборудование для разработки карьеров и обогащения материалов;

- 8) Машины для устройства снежно-ледяных покрытий;
- 9) Грузоподъемные машины;
- 10) Машины непрерывного транспорта.

Представленная классификация не является всеобъемлющей и может быть дополнена редкими и узкоспециализированными машинами, однако дает возможность оценить различные виды машин с точки зрения функций управления [188].

В данной работе наибольший интерес представляют колесные машины, применяемые при строительстве дорог, следовательно, дальнейшие исследования будут посвящены колесным машинам 2 и 3 групп [188].

При управлении ДСМ ЧО выполняет определенный набор функций. Для того чтобы заменить ЧО на СУ необходимо формализовать эти функции, обосновать необходимые информационные параметры и разработать оптимальные алгоритмы и методы управления [188].

Таблица 1.1

Функции управления ДСМ

Функция \ Машина	Бульдозер	Фронтальный погрузчик	Экскаватор траншейный	Автогрейдер	Скрепер	Дорожная фреза	Асфальтоукладчик	Каток
Учет выполненных работ	+	+	+	+	+	+	+	+
Управление загрузкой ДВС и трансмиссии	+	+	+	+	+	+	+	+
Диагностика ДСМ	+	+	+	+	+	+	+	+
Управление режимом резания/уплотнения	+	+	+	+	+	+	+/-	+
Управление положением РО	+	+	+	+	+	+	+	-
Ориентация ДСМ на площадке	+	+	+	+	+	+	+	+
Определение траектории движения	+	+	+	+	+	+	+	+
Управление курсом движения ДСМ	+	+	+	+	+	+	+	+

Таким образом, по характеру выполняемых функций все рассмотренные ДСМ очень похожи, что дает возможность применять универсальные методы управления (см. таблицу 1.1) [188].

Исходя из вышесказанного, был определен круг задач, которые должны решать перспективные СУ ДСМ [188]:

1. Определение рациональной траектории движения ДСМ по строительной площадке на основе электронной карты местности и электронного проекта сооружения (рисунок 1.1.1).
2. Определение текущих координат ДСМ на местности и направления движения.
3. Управление курсом и скоростью движения ДСМ.
4. Определение высотных и угловых координат РО ДСМ.
5. Сравнение в реальном режиме времени положения РО в каждой точке с проектным значением.
6. Управляющее воздействие на РО с целью соблюдения проектных значений.
7. Управление нагрузкой ДВС и трансмиссии.
8. Учет выполненных работ.

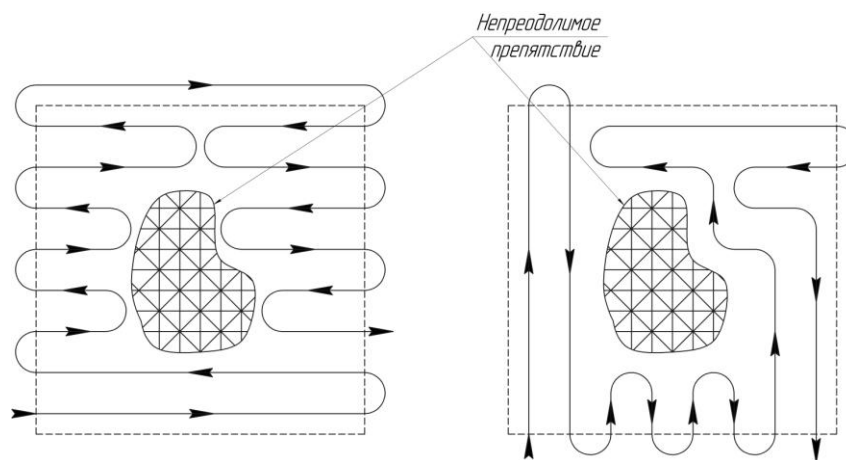


Рисунок 1.1.1 – Различные траектории движения дорожно-строительной машины по строительной площадке

Кроме того, необходимо учитывать производительность и мощность используемой на данный момент машины, т.к. в процессе работы может возникнуть необходимость выполнения 2-х и более проходов по одному участку, что обусловлено ограниченной глубиной копания ДСМ [188].

Конечной целью функционирования СУ должно быть сокращение затрат на строительство сооружения путем выбора оптимальной траектории, уменьшения

количества проходов по одному месту, сокращение ручного труда и, следовательно, экономии времени и топлива [188].

На основании вышеизложенного, можно составить упрощенную структурную схему системы автономного управления ДСМ, которая на основе построенной траектории, сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), текущего состояния машины, цифрового проекта сооружения и цифровой карты местности формирует управляющие воздействия на ДСМ (рисунок 1.1.2) [195].

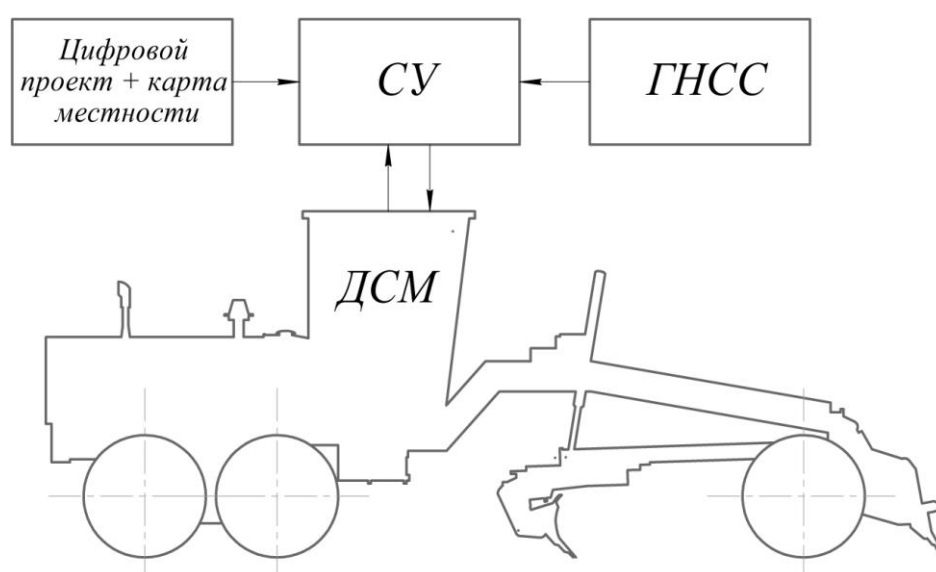


Рисунок 1.1.2 – Упрощенная структурная схема системы управления дорожно-строительной машины

Основными конструктивными особенностями ДСМ, влияющими на математическую модель рабочего процесса, выбор методов управления и применение критерия эффективности являются расположение РО, движение которого по заданной траектории необходимо обеспечить, относительно базы машины и тип рулевого управления машины (табл. 1.2) [188].

Из таблицы 1.2 можно сделать вывод о том, что из рассмотренных ДСМ автогрейдер может быть оснащен всеми перечисленными типами рулевого управления с расположением РО в базе. Таким образом, для дальнейших исследований целесообразно выбрать автогрейдер в качестве основной машины и

фронтальный погрузчик в качестве второй машины по причине сочетания ШСР и РО перед базой машины [188].

Таблица 1.2

Конструктивные особенности ДСМ								
Конструктивные особенности	Машина							
	Бульдозер	Фронтальный погрузчик	Экскаватор траншейный	Автогрейдер	Скрепер	Дорожная фреза	Асфальтоукладчик	Каток
РО в базе машины	-	-	-	+	+	+	+	-
РО перед базой	+	+	+	+	-	-	-	-
РО за базой	+	-	+	+	-	-	+	-
Передние управляемые колеса	+	-	+	+	-	+	+	+
ШСР	-	+	-	+	+	-	-	+

Таким образом, можно сформулировать концепцию автономного управления ДСМ. Под автономным управлением ДСМ следует понимать выполнение системой автономного управления всех функций ЧО, представленных в таблице 1.1 на основе методологии автономного управления. Применение подобных систем в совокупности с BIM-технологиями, которые необходимы для создания 3D-проекта сооружения и цифровой карты местности, позволит на основе информации с измерительной аппаратуры создавать «цифрового двойника» возводимого объекта на каждом этапе работ и использовать его в качестве исходной информации для следующих этапов и на протяжении всего жизненного цикла. Методы управления РО достаточно подробно описаны в предшествующих исследованиях. Дальнейшие исследования были направлены на разработку методов построения траектории движения колесной ДСМ, методов определения координат ДСМ и ее РО в режиме реального времени, методов управления направлением движения, а также поиск вариантов технической реализации системы автономного управления ДСМ, функционирующей на основе разработанных методов [188,195].

1.2. Анализ предшествующих исследований

Общим вопросам повышения эффективности ДСМ были посвящены работы: Т.В. Алексеевой [19,20,21,22], В.Ф. Амельченко [24,25,26,27], И.В. Бояркиной [47,48], А.М. Васьковского [51], В.С. Дегтярева [80,81], В.П. Денисова [82], Ю.М. Княжева [109], Б.Д. Кононыхина [112,113,114,115,116], П.А. Корчагина [118], Э.Н. Кузина [122,123,124,125,126], В.Н. Кузнецовой [127], Е.Ю. Малиновского [166], В.А. Мещерякова [136,137,138], В.Н. Тарасова [203,204], А.М. Холодова [220,221,222], В.С. Щербакова [229,233] и др. [18,35,36,43, 44,47,48,54,60,69,70,104,110,121,132,145,146,154,161,184,185,205,223,226,227].

Помимо печатных работ, были проанализированы патенты и авторские свидетельства, посвященные повышению эффективности ДСМ [148-151,234-239].

Проанализированные работы можно разделить на 2 группы:

1. Работы, посвященные повышению производительности ДСМ;
2. Работы, посвященные повышению качества выполняемых работ.

Работы Э.Н. Кузина посвящены землеройным машинам непрерывного действия и перспективам развития строительных и дорожных машин. Автор рассмотрел и описал основные причины возникновения ошибки позиционирования РО в пространстве [122,123,124,125,126].

Б.Д. Кононыхин разработал и исследовал лазерные СУ положением РО автогрейдеров, описал динамику процесса управления РО [112,113,114,115,116].

В работах В.С. Щербакова рассмотрены и описаны математические модели машин с разным расположением РО: перед машиной, в базе машины и за машиной, выведены теоремы и следствия, раскрывающие планировочные свойства машин. В работе также предложены в качестве критериев эффективности коэффициенты сглаживания – отношение среднеквадратичного отклонения микрорельефа до и после прохода машины [229,233].

В работах А.А. Портновой разработана математическая модель процесса поворота автогрейдера с ШСР и определено оптимальное расположение шарнира,

коэффициент пропорциональности между углами поворота колес и рамы для обеспечения движения передних и задних колес по одной колее [162,163,164,231].

В работах В.А. Мещерякова разработана методика нейросетевой идентификации и моделирования рабочих процессов землеройно-транспортных машин, предложена методика разработки адаптивных СУ рабочими процессами землеройно-транспортных машин [136,137].

Вопросам повышения эффективности колесных машин, их взаимодействию с опорной поверхностью и моделированию криволинейного движения посвящены работы Жилейкина М.М. [90,91,92,93], Закина Я.Х. [97,98], Смирнова Г.А. [180], Трояновской И.П. [206,207,208,209], Ульянова Н.А. [211,212,213], Фаробина Я.Е. [215].

Не меньший интерес представляют работы, посвященные системам автономного управления сельскохозяйственными машинами и автомобилями [66,71,102,103,155,156,187,218].

В работе В.И. Поддубного разработана модель динамической системы «опорная поверхность – шина – колесная машина – система управления движением», получены математические модели управления движением колесных машин с использованием ПИ-регулирования с наблюдателем и управления на основе базисных маневров, разработана СУ движением, включающая в себя электромеханическую часть и комплекс прикладного программного обеспечения, которая позволяет задавать границы обрабатываемого поля, траекторию движения, определять величину необходимого угла поворота рулевого колеса или слова рамы трактора с шарнирной рамой для обеспечения задаваемого движения. Для определения текущего положения колёсной машины используются сигналы ГНСС [156].

В работах А.В. Калоева выявлены закономерности движения машино-тракторных агрегатов, разработаны научные основы и общие принципы построения систем автоматического вождения самоходных машин. Выявлено, что машино-тракторный агрегат, как объект автоматического вождения, имеет

несколько выходов и, следовательно, должен иметь столько же регуляторов, т.е. СУ должна быть многоконтурной [102,103].

В работе Omead Amidi (Университет Карнеги Меллон) предложен метод следования траектории «чистое преследование» (Pure Pursuit) и структура СУ для автономного транспортного средства [11].

В работе коллектива авторов из Стенфордского университета представлены математическая модель, метод управления «Стэнли» (Stanley), структура СУ и результаты участия автомобиля Stanley в соревновании автономных транспортных средств DARPA Grand Challenge [14].

В работе Jarrod M. Snider (Университет Карнеги Меллон) продолжено исследование метода «чистое преследование» и предложен метод «Стэнли» (Stanley) использованный для управления автомобилем Stanley в соревновании автономных транспортных средств DARPA Grand Challenge [5].

В работе Matthew J. Barton предложены математические модели и методы управления (Pure Pursuit, Follow the Carrot) для автономных автомобилей в условиях городской среды [8].

В работе Ola Ringdahl разработана математическая модель, алгоритм управления и предложена система автономного вождения по пересеченной местности для харвестера. В работе рассмотрено применение методов «векторное преследование», «чистое преследование» и метода Follow the Carrot [10].

Анализ работ, посвященных совершенствованию СУ ДСМ, показал, что основным направлением совершенствования таких систем является снижение неуправляемых перемещений РО. По вопросам автономного управления курсом и скоростью движения ДСМ научные исследования практически не проводились.

В то же время, работы по автономному вождению сельскохозяйственных машин известны достаточно давно как в отечественной науке, так и в зарубежной [10,102,103,155,156,187]. Наиболее близкими данному исследованию работами являются работы по управлению автономными автомобилями [1,5,7,8,14,66,71,218].

В связи с этим, перспективным направлением исследований является адаптивное управление методов автономного управления сельскохозяйственных машин и автомобилей для управления ДСМ, а также разработка новых методов управления.

1.3. Анализ теорий копания грунта

Математическое описание рабочих процессов ДСМ невозможно без рассмотрения математической модели силы реакции разрабатываемого грунта на РО. Приоритет по созданию основ теории копания грунтов принадлежит отечественным ученым: В.П. Горячкину [73], Н.Г. Домбровскому [84], А.Н. Зеленину [99,107], Ю.А. Ветрову [55,56,57,133], К.А. Артемьеву [31], И.А. Недорезову [142,143,144], В.А. Баладинскому [37], В.И. Баловневу [38,39,40,41,42,107], А.М. Завьялову [95,96], Д.И. Федорову [216], Б.А. Бондаровичу [217] и др.

В.П. Горячкин исследовал работу плугов [73], Н.Г. Домбровский определял усилия копания грунта экскаваторами [84], А.Н. Зеленин исследовал процесс разрушения мерзлых и немерзлых грунтов [99], Ю.А. Ветров рассматривал процесс резания как пространственный процесс с учетом затупления РО [55,56,57], К.А. Артемьев ввел понятие подпорной стенки [31].

Все предложенные теории можно условно разделить на две группы [232]:

1) теории, основанные преимущественно на результатах экспериментальных исследований, раскрывающих в той или иной степени сущность процесса резания, но главным образом, устанавливающих количественные связи между параметрами РО, параметрами грунта и режимом резания, с одной стороны, и силой сопротивления резанию – с другой;

2) теории, базирующиеся на основных положениях механики сплошной среды и теории прочности.

В данном случае дается более четкое представление о сущности процесса резания, а количественное влияние параметров РО, параметров грунта и режимов резания на силу сопротивления резанию увязано не с побочными характеристиками грунта, а с теми его характеристиками, которые обуславливают его прочностные свойства [232].

Все, когда-либо предложенные методы определения силы сопротивления резанию грунтов можно классифицировать следующим образом [232]:

1. Методы, основанные на допущении, что сил сопротивления резанию пропорциональны площади вырезаемой стружки. Эти методы получили наибольшее распространение, хотя они не учитывают влияния ряда дополнительных параметров на величину возникающих сил сопротивления резанию.

2. Методы, основанные на допущении, что силы сопротивления резанию, пропорциональны параметрам режущей кромки. Эти методы не получили широкого признания.

3. Методы, основанные на учете основных факторов, влияющих на величину возникающих сил сопротивления: параметры грунта; параметры РО, включая периметры режущей кромки и ее затупление; режимы резания.

Академик В.П. Горячкин, систематизируя экспериментальный материал, отметил, что отношение силы сопротивления плуга P к единице площади поперечного сечения пласта $F = h \cdot b$ позволяет судить о силе сопротивления при резании плугом почвы [79].

Сопоставив данные по величине P/hb из русской, европейской и американской практики, В.П. Горячкин нашел, что эти данные примерно одинаковы и изменяются в пределах от 2 до 6 Н/см² (20-60 кН/м²) [73].

В.П. Горячкин предложил следующую формулу для определения силы сопротивления, возникающей при работе сельскохозяйственного плуга [73]:

$$P_1 = \mu_1 G + kbh + \varepsilon bhV^2, \quad (1.3.1)$$

где P_1 – касательная сила тяги плуга; μ_1 – коэффициент трения плуга о грунт; $\mu_1 = 0,25-0,4$; G – сила веса плуга, кН; k – удельное сопротивление грунта резанию,

которое находится опытным путем: для плуга $2-6 \text{ Н/см}^2$ ($20-60 \text{ кН/м}^2$); h – толщина вырезаемого пласта грунта, для плуга $h = 0,15-0,2 \text{ м}$; ε – коэффициент, учитывающий силу сопротивления, возникающую при отбрасывании вырезанного пласта грунта, в среднем $\varepsilon = 0,1$; k ; V – скорость движения плуга, м/с.

Первый член формулы (1.3.1) учитывает силу трения плуга в борозде; второй член – силу сопротивления резанию; третий член – силу, затрачиваемую на отбрасывание пласта в сторону [73].

Первый член этой формулы при работе плуга составляет около 41%, второй – приблизительно 56 %, третий – около 3% всей силы сопротивления резанию.

Формула В.П. Горячкина, справедливая для плугов, у которых $F = const$, а $b \approx 1,5h$. Однако эта формула дает неприемлемые результаты для землеройных машин вследствие резкого различия конструкции РО и отличия свойств грунта от свойств почвы [73].

При тяговых расчетах землеройных машин, для определения сил сопротивления резанию, обычно пользуются вторым членом формулы В.П. Горячкина, принимая отличные от рекомендованных им значений удельного сопротивления резанию k . Значения величины k определяются опытным путем для каждого типа РО и для различных видов грунтов [73].

А.Н. Зеленин уточнил, что силы сопротивления резанию зависят не только от грунтовых условий и площади поперечного сечения стружки, но и от ширины и глубины резания, от соотношения между шириной и глубиной резания (при $F = const$), угла резания, формы и расположения зубьев, участия в процессе резания боковых стенок ковша и ряда других факторов [99].

А.Н. Зелениным было установлено, что величина C_y – число ударов динамического плотномера – прямо пропорциональна силе сопротивления резанию для любого РО, вследствие чего величина C_y может являться критерием сопротивляемости грунтов резанию. В настоящее время оценка сопротивляемости грунтов при резании величиной C_y стала общепринятой [99].

Для расчета касательной (горизонтальной) составляющей силы сопротивления резанию А.Н. Зеленин предложил следующие зависимости [99]:

1) для элементарных профилей (боковые стенки ковшей, отдельные зубья и пр.)

$$P_p = C_y h^{1,35} (1 + 0,1S) \left(1 - \frac{90 - \alpha}{180}\right) \beta_0; \quad (1.3.2)$$

2) при резании ковшами без зубьев

$$P_p = C_y h^{1,35} (1 + 1,26l) (1 + 0,0075\alpha) (1 + 0,03S) \beta_0 \mu; \quad (1.3.3)$$

3) при резании ковшами с зубьями

$$P_p = C_y h^{1,35} (1 + 1,26l) (1 + 0,0075\alpha) z, \quad (1.3.4)$$

где C_y – число ударов динамического плотномера; h – глубина резания, см; S – толщина элементарного профиля, см; l – длина горизонтальной режущей кромки рабочего органа, м; α – угол резания, град; β_0 – коэффициент, учитывающий влияние угла заострения β элементарного профиля; μ – коэффициент, учитывающий наличие открытых стенок; z – множитель, учитывающий влияние зубьев, величина которого зависит от значений h и l и от соотношения a_1/b_1 ; a_1 – расстояние между зубьями; b_1 – ширина зуба.

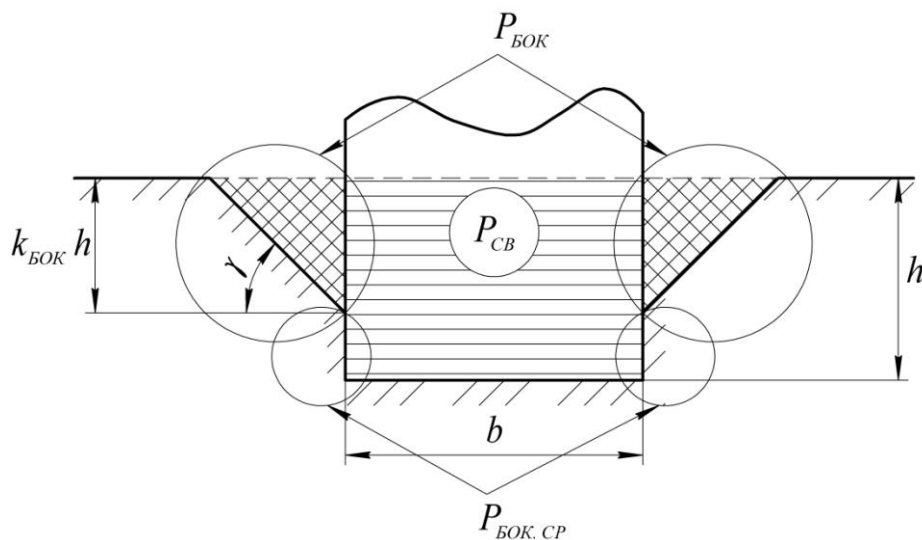


Рисунок 1.3.1 – Зоны действия составляющих силы сопротивления резанию

Ю.А. Ветров провел значительную экспериментально-теоретическую работу по резанию грунтов и горных пород [55,56,57].

Главными аргументами, влияющими на процесс резания, указывает Ю.А. Ветров, являются помимо размеров среза (ширина и толщина) пространственность взаимодействия режущего инструмента с грунтом, его затупление или износ и углы резания (в первую очередь угол, образуемый траекторией и передней гранью режущего клина) [55,56,57].

Пространственность процесса проявляется в разрушении грунта в пределах трапецеидальной прорези, имеющей ширину, значительно превосходящую ширину ножа при заблокированном резании (рисунок 1.3.1) [55,56,57].

Сила сопротивления заблокированного резания простым острым ножом рассматривается как состоящая из трех частей [55,56,57]:

1) силы для преодоления лобовых сопротивлений ножу P_{CB} , пропорциональны площади лобовой части и ширине среза, зависят от угла резания и от категории грунта;

2) силы разрушения грунта в боковых расширениях прорези $P_{БОК}$ пропорциональны площади их сечений, зависят от категории грунта и практически не зависят от угла резания и ширины среза;

3) силы бокового среза $P_{БОК.СР}$ пропорциональны толщине среза, зависят от категории грунта и практически не зависят от ширины среза, а также от угла резания.

Результирующая сила заблокированного резания простым острым ножом выражается трехчленом [55,56,57]:

$$P = P_{CB} + P_{БОК} + P_{БОК.СР} \quad (1.3.5)$$

Для ножа с затупленной режущей кромкой вводится дополнительная и пропорциональная длине режущей кромки сила сопротивления резанию $P_{ЗАТ(ПЛ.ИЗН)}$ и формула (1.3.5) принимает вид [55,56,57]:

$$P = P_{CB} + P_{БОК} + P_{БОК.СР} + P_{ЗАТ(ПЛ.ИЗН)}, \quad (1.3.6)$$

где $P_{CB} = p_{CB} F_{CB}$; $P_{БОК.СР} = p_{БОК.СР} L_{БОК.СР}$; $P_{ЗАТ(ПЛ.ИЗН)} = p_{ЗАТ(ПЛ.ИЗН)} L_{ЗАТ(ПЛ.ИЗН)}$; $P_{БОК} = p_{БОК} F_{БОК}$, P (с индексами СВ, БОК, БОК.СР, ЗАТ(ПЛ.ИЗН)) – удельные сопротивления соответственно в лобовой части, боковых расширениях прорези и

среза грунта боковыми ребрами ножа и на затупленной режущей кромке ножа; F_{CB} и $F_{БОК}$ – площади соответствующих зон действия сил, м².

$$F_{CB} = bh; F_{БОК} = k_{БОК}^2 h^2 ctg\gamma, \quad (1.3.7)$$

где $k_{БОК}$ – коэффициент глубины расширяющейся части прорези, равный (для разных грунтов) 0,8-0,95; γ – угол скола, соответственно равный для ножа 40-46°; для суглинка 30°, для тяжелого суглинка 40°, для глины 36°, для замерзшей глины и мела 30°; $L_{БОК.СР}$ – длина линии среза на боковых гранях ножа, $L_{БОК.СР} = 2h(1 - k_{БОК})$; $L_{ЗАТ (ПЛ.ИЗН)}$ – длина затупленной или изношенной режущей кромки ножа, равная ширине среза b , $L_{ЗАТ (ПЛ.ИЗН)} = b$.

Н. Г. Домбровский предложил определять силу сопротивления копанию на РО ДСМ по совокупности всех этапов процесса копания, включающих резание грунта, перемещение его по РО, перемещение призмы, а также силу процесса наполнения ковшовых РО. В соответствии с этим величина касательной составляющей силы сопротивления копанию P_{01} определяется им как сумма сил сопротивлений: силы сопротивления трению от перемещения рабочего органа по грунту P_{mp} , силы сопротивления резанию P_p и силы сопротивления перемещению призмы волочения и силы наполнения ковша P_n [84]:

$$P_{01} = P_{mp} + P_p + P_n. \quad (1.3.8)$$

Значения отдельных составляющих имеют вид [84]:

$$P_{01} = \mu N + kbc + \varepsilon(k_n q + q_{np}), \quad (1.3.9)$$

где μ – коэффициент трения РО о грунт; N – давление режущей части на грунт; q_{np} – объем призмы волочения; k_n – коэффициент наполнения ковша (отношение объема разрыхленного грунта в ковше к его геометрическому объему); q – геометрическая емкость ковша; ε – коэффициент силы сопротивления наполнению ковша и силы перемещения призмы волочения.

Относя все силы сопротивления копания к сечению снимаемой стружки грунта и введя понятие обобщенного коэффициента удельного сопротивления копанию k_1 , Н. Г. Домбровский предложил упрощенную формулу для практических расчетов сил сопротивления копанию [84]:

$$P_{01} = k_1 b c. \quad (1.3.10)$$

Как показали многочисленные исследования, между касательной и нормальной составляющими силы при установившемся процессе копания существует приближенная зависимость [84]:

$$P_{02} \approx \psi P_{01}, \quad (1.3.11)$$

где ψ – коэффициент, величина которого колеблется в пределах 0,1-0,6 в зависимости от режима копания, угла резания и степени износа (затупления) режущей кромки.

Все вышеописанные выражения для определения сил сопротивления копанию дают среднемаксимальные значения составляющих, тогда как анализ нагрузок на РО ДСМ показал, что реальные кривые изменения сил могут быть представлены как случайные процессы [216,217,232].

Федоров Д.И. и Бондарович Б.А. предложили стохастическую модель процесса копания, силу сопротивления копанию представили в виде суммы двух слагаемых: тренда F_T и флюктуации F_ϕ [216,217]:

$$F_{PO} = F_T + F_\phi, \quad (1.3.12)$$

где F_{PO} – сила сопротивления копанию грунта на РО; F_T – низкочастотная составляющая силы сопротивления копанию (тренд); F_ϕ – высокочастотная составляющая силы сопротивления копанию (флюктуация).

Низкочастотная составляющая силы сопротивления копанию разрабатываемого грунта на РО ДСМ представляет собой среднемаксимальное значение и вычисляется с помощью одной из выше рассмотренных моделей [216,217].

Высокочастотная составляющая силы сопротивления копанию F_ϕ может быть описана с помощью вероятностного представления случайных процессов [216,217].

Корреляционные функции флюктуации при резании грунтов могут быть аппроксимированы выражением [216,217]:

$$R_\phi(\tau) = D_\phi \cdot e^{-\alpha_\phi \cdot |\tau|} \cdot \cos(\beta_\phi \cdot \tau), \quad (1.3.13)$$

где D_ϕ – дисперсия флюктуации; α_ϕ и β_ϕ – параметры корреляционной функции; τ – интервал времени корреляции.

Спектральная плотность случайной флюктуации, в соответствии с преобразованием Фурье, будет равна [216,217]:

$$S_\phi(f) = 2 \cdot \alpha_\phi \cdot D_\phi \cdot \left[\frac{1}{\alpha_\phi^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot (f + f_0)^2} + \frac{1}{\alpha_\phi^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot (f - f_0)^2} \right], \quad (1.3.14)$$

где f – текущая частота колебаний, Гц; f_0 – основная частота колебаний случайного процесса, Гц.

Проведенный анализ моделей процесса копания позволил сделать вывод, что на сегодняшний день процессы копания грунта достаточно хорошо изучены. В данной работе для математического моделирования реакции разрабатываемого грунта на РО предлагается использовать стохастическую модель, описанную выражением (1.3.12).

1.4. Анализ математических моделей микрорельефа

В настоящее время для изучения неуправляемых перемещений ДСМ, вызванных неровностями микрорельефа используют методы статистической динамики с применением стохастических моделей микрорельефа [33,72,88,89,122,152,159,169,178,201,229,230,232].

Неровности поверхности условно можно разделить на 3 основные составляющие: макропрофиль, микропрофиль и шероховатость. Макропрофиль состоит из длинных плавных неровностей (длина волны от 100 м и более) и фактически не вызывает колебаний машины. Микропрофиль состоит из неровностей длиной от 0,1 м до 100 м и вызывает существенные колебания машины. Шероховатости (длина волны менее 0,1 м) сглаживаются шинами и не вызывают ощутимых колебаний машины [193,229,230,232].

В связи с этим при математическом описании рельефа учитывают и используют только параметры микропрофиля [193,229,230,232].

На сегодняшний день вероятностные характеристики микропрофиля различных поверхностей (дорог, грунтов) достаточно хорошо изучены. Микропрофиль принято рассматривать как случайную функцию, удовлетворяющую следующим условиям: функция стационарна; микропрофиль изменяется случайным образом только в вертикальной продольной плоскости; длины волны неровностей ограничены по верхнему и нижнему пределам; ординаты микропрофиля подчиняются нормальному закону распределения [193,229,230,232].

Достаточными для математического моделирования статистическими характеристиками микропрофиля грунта являются его корреляционная функция $R(l)$ и спектральная плотность $S(\omega)$ [193,229,230,232].

Корреляционная функция $R(l)$ дает представление об изменении микропрофиля по длине участка l , спектральная плотность $S(\omega)$ дает представление о частоте повторения длин неровностей. Аргумент спектральной плотности – угловая частота дороги («путевая частота») [193,229,230,232]:

$$\omega = 2 \cdot \frac{\pi}{l}. \quad (1.4.1)$$

В общем случае поверхность грунта описывается следующей функцией [193,229,230,232]

$$z = z(x, y), \quad (1.4.2)$$

где z – вертикальная координата точки поверхности; x, y – продольная и поперечная координаты точки поверхности.

Двумерная корреляционная функция такой поверхности имеет вид [193,229,230,232]

$$R(\Delta x, \Delta y) = \lim_{\substack{x \rightarrow \infty \\ y \rightarrow \infty}} \frac{1}{4xy} \int_{-x}^x \int_{-y}^y z(x, y) \cdot z(x + \Delta x, y + \Delta y) dx dy. \quad (1.4.3)$$

В связи с трудоемкостью вычисления двумерной корреляционной функции $R(\Delta x, \Delta y)$, в настоящее время микрорельеф описывают двумя корреляционными функциями микропрофиля по левой и правой колее, а поперечный уклон в поперечном сечении оценивают по вертикальным координатам левой и правой колеи [193,229,230,232].

В общем виде существующие модели микрорельефа можно представить в виде [193,229,230,232]:

$$R(l) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\alpha_i |l|} \cdot \cos \beta_i l, \quad (1.4.4)$$

где $\sum_{i=1}^n A_i = 1$; α_i – параметры, характеризующие затухание корреляции; β_i – параметры, характеризующие периодичность корреляции.

Кроме этого при математическом описании неровностей микрорельефа иногда используются и другие уравнения, например вида [229,230,232]:

$$R(l) = A_0 e^{-\alpha_0 |l|} \cdot (1 + \alpha_0 |l|) + \sum_{i=1}^n A_i e^{-\alpha_i |l|} \cdot \left(\cos \beta_i l + \frac{\alpha_i}{\beta_i} \sin \beta_i l \right). \quad (1.4.5)$$

Например, в работе [15] микрорельеф целины описан уравнением:

$$R(l) = \sigma \cdot \left(A_1 e^{-\alpha_1 |l|} + A_2 e^{-\alpha_2 |l|} \sin \frac{\pi l}{\beta} \right), \quad (1.4.6)$$

где $\sigma = 0,19$ м; $A_1 = 0,28$; $A_2 = 0,72$; $\alpha_1 = 3,5$ м; $\alpha_2 = 0,67$ м; $\beta = 3,05$ м.

Микрорельеф сельскохозяйственного поля описывается уравнением [229,230,232]:

$$R(l) = \sigma \cdot e^{-\alpha_1 |l|} \cos \beta l, \quad (1.4.7)$$

где $\sigma = 0,015 \dots 0,08$ м – продольный профиль; $\sigma = 0,05 \dots 0,28$ м – поперечный профиль; $\alpha = 1,4 \dots 2,8$ м – продольный профиль; $\alpha = 2,3 \dots 3,9$ м – поперечный профиль; $\beta = 1,0 \dots 1,5$ м – продольный профиль; $\beta = 1,2 \dots 3,6$ м – поперечный профиль.

Спектральную плотность можно определить через корреляционную функцию, используя преобразование Фурье [229,230,232]:

$$R(l) = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) \cdot \cos(\omega, l) d\omega; \quad (1.4.8)$$

$$S(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} R(l) \cdot \cos(\omega, l) dl. \quad (1.4.9)$$

Для реализации случайного микрорельефа на ЭВМ обычно используется алгоритм, основанный на преобразовании стационарной последовательности x_i независимых равномерно распределенных случайных чисел (дискретный белый

шум) в последовательность z_n , для чего используется рекуррентное уравнение вида [229,230,232]:

$$\begin{aligned} z_i &= a_0 x_i + a_1 x_{i-1} + \dots + a_l x_{i-l} - \\ &- b_1 z_{i-1} - b_2 z_{i-2} - \dots - b_m z_{i-m} = \\ &= \sum_{k=0}^l a_k \cdot x_{i-k} - \sum_{k=1}^m b_k \cdot z_{i-k}, \end{aligned} \quad (1.4.10)$$

где x_i – реализация независимых распределенных чисел (белый шум) с параметрами: $m_x = 0$ и $\sigma_x = 1$.

При этом вид рекуррентного уравнения определяется видом корреляционной функции [229,230,232].

Уравнение (1.4.10) описывает поведение некоторого дискретного фильтра, который преобразует подаваемый на его вход дискретный белый шум, в случайный процесс с заданной корреляционной характеристикой. Передаточная функция этого фильтра, в общем виде, имеет вид [229,230,232]:

$$z(y) = \frac{a_0 + a_1 y + \dots + a_l y^l}{1 + b_1 y + \dots + b_m y^m} = \frac{\sum_{k=0}^l a_k y^k}{1 + \sum_{k=1}^m b_k y^k}. \quad (1.4.11)$$

При составлении расчетной схемы используют точечный контакт шины с поверхностью грунта, поэтому возмущающее воздействие усредняют по площадке пятна контакта с микропрофилем. Для этого используется выражение [229,230,232]:

$$z(m) = \frac{1}{x_0} \cdot \sum_{i-k}^{i+k} z(i), \quad (1.4.12)$$

где $z(m)$ – ординаты сглаженного микропрофиля; $k = 0,5 (x_0 - 1)$; x_0 – интервал осреднения; $z(i)$ – ординаты несглаженного микропрофиля.

Анализ предшествующих исследований показал, что в подавляющем числе исследований ДСМ, где рассматривался вопрос взаимодействия ХО и микрорельефа, применялся ряд допущений из-за сложности и трудоемкости вычисления двумерной корреляционной функции (1.4.3), и предлагалось описывать микрорельеф двумя корреляционными функциями микропрофиля по

левой и правой колее. Данный способ подходит только для случая прямолинейного движения машины, но при усложнении задачи и условии непрямолинейного движения, подобные вычисления становятся некорректными.

Стремительное развитие вычислительной техники позволяет на сегодняшний день производить большие объемы вычислений, соответственно вычисление двумерной корреляционной функции может быть реализовано с минимальными затратами вычислительных мощностей [193].

Математическая модель взаимодействия микрорельефа с ХО должна производить генерацию карты высот. В данном случае данные представлены в виде двумерного массива, в котором заданы две координаты (x , y – по длине и ширине массива), а высота задается значением в конкретной ячейке. Для решения этой задачи в машинной графике существует целая ветвь. Она занимается разработкой алгоритмов преобразования входных данных и построением на их основе ландшафтов. Для генерации карты высот наиболее подходят шум Перлина и холмовой алгоритм [193,244].

Моделирование микрорельефа с помощью шума Перлина

Рабочая площадка представляет собой сетку, заполненную вещественными числами от 0 до 4. Каждое число порождает линию сетки, а значит, все стороны каждого квадрата последней имеют длину, равную одной единице [244].

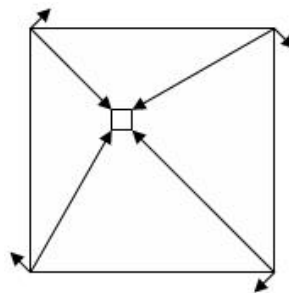


Рисунок 1.4.1 – Единичные вектора ячейки

В каждой точке сетки строится случайный вектор нормали. Это обычный двумерный вектор единичной длины, который указывает в случайном направлении в пределах каждого из квадратов. Далее для каждой точки

микрорельефа выбирается та из ячеек сетки, где она расположена. Таким образом, определяется значение, которое основано исключительно на данных этой ячейки. Следующий шаг – создать четыре диагональных вектора, соединяющих углы ячейки с текущей точкой (рисунок 1.4.1) [244].

Каждый угол ячейки сетки теперь является базой для двух векторов – случайного единичного вектора и вектора в направлении точки, которую необходимо построить. Для каждой пары таких векторов находится скалярное произведение. Оно даст скалярное значение высоты каждого из углов сетки. Далее необходимо объединить эти четыре значения и найти высоту точки, которую необходимо сгенерировать. Выполнение данного шага возможно различными способами, дающими разный конечный результат, чаще всего применяется взвешенная интерполяция четырех значений с учетом близости текущей позиции к каждому углу сетки [244].

Основным достоинством использования шумовой функции при генерации микрорельефа является то, что нет необходимости хранить карту высот, а достаточно лишь использовать данные справочной таблицы векторов, – все остальное для восстановления конечной карты высот микрорельефа сделает шумовая функция [244].

Моделирование микрорельефа с использованием Холмового алгоритма

Это простой итерационный алгоритм, основанный на нескольких входных параметрах. Алгоритм состоит из нескольких шагов [193,244]:

- создается двумерный массив и инициализируется нулевым уровнем (все ячейки заполняются нулями);
- берется случайная точка в массиве или около его границ (за границами), а также берется случайный радиус в заранее заданных пределах. Выбор этих пределов влияет на вид микрорельефа – либо он будет пологим, либо скалистым;
 - в выбранной точке «поднимается» холм заданного радиуса;
 - возврат ко второму шагу и так далее до выбранного количества шагов;
 - проводится нормализация микрорельефа.

1.5. Анализ и классификация систем управления дорожно-строительными машинами

На сегодняшний день лидерами по производству и внедрению СУ ДСМ являются такие компании как Trimble Navigation (США), Leica Geosystems (Германия), Topcon Corporation (Япония) [195,245,247,252].

В ассортименте продукции всех перечисленных компаний входят различные СУ, основанные на разных принципах привязки к местности и контроля параметров.

Существующие СУ ДСМ условно разделяются на 3 класса – 1D, 2D и 3D [195,245,247,252].

Одномерные СУ позволяют определить только высотную координату РО ДСМ относительно задающей линии – бордюра или струны. На сегодняшний день такие СУ практически не выпускаются и устанавливаются в основном как базовые СУ на низкоскоростную технику, например асфальтоукладчики [195,245,247,252].

Двухмерные СУ контролируют положение РО ДСМ по двум координатам – вертикальной координате РО и углу поперечного уклона РО. Точкой отсчета в таких системах являются, как правило, лазерные построители плоскости или ультразвуковой излучатель. В старших моделях СУ в состав добавляют базовые станции и приемники сигналов ГНСС. При работе данного типа систем контроль за расположением машины на строительной площадке, скоростью и направлением движения осуществляется оператором [195,245,247,252].

Трехмерные СУ помимо контроля высотного и углового положения РО вычисляют положение машины на строительной площадке. При этом задатчиком в такой системе выступает цифровой проект возводимого сооружения. Система определяет текущее положение и сравнивает его с проектом. На основании этой информации формируется управляющее воздействие на РО машины. На панель управления в кабине выводится вся оперативная информация о проекте и

текущем расположении машины. Курс движения и скорость ДСМ при использовании подобных систем определяются ЧО машины [195,245,247,252].

Трехмерные СУ разделяются на 2 подгруппы по виду задатчика: системы, использующие наземные задатчики в виде роботизированных тахеометров и круговые призмы в качестве датчиков и системы, использующие сигналы ГНСС. У каждого вида систем есть свои преимущества и недостатки [195,245,247,252].

Системы с наземным задатчиком.

В состав данных СУ входят: роботизированный тахеометр, круговая призма, устанавливаемая на штатив, который закреплен на РО, датчик поперечного наклона РО, датчик угла захвата РО (для автогрейдеров), бортовой компьютер и система связи между машиной и тахеометром [245,247,252].

Преимущества: высокая точность, отсутствие погрешности при передаче сигналов [245,247,252].

Недостатки: ограниченная область работы, необходимость установки тахеометра для каждой машины [245,247,252].

Системы ГНСС.

В состав данных СУ входят: базовая станция ГНСС, один или два датчика ГНСС, устанавливаемые на штативы, которые закреплены на РО, датчик поперечного наклона РО, датчик угла захвата РО (для автогрейдеров), бортовой компьютер и система связи между машиной и базовой станцией [245,247,252].

Преимущества системы: неограниченная область работы, необходимость установки одной базовой станции для всего комплекта машин [245,247,252].

Недостатки: нестабильная точность, связанная с погрешностями ГНСС, невозможность работы в тоннелях [245,247,252].

Проблема погрешности ГНСС в последнее время решается с помощью дополнительного задатчика – лазерного построителя рабочей зоны и приемников, устанавливаемых на штативы, которые закреплены на РО. Данный комплект позволяет повысить точность работы до 1-2 мм. Эта технология получила название mmGPS [245,247,252].

Система Trimble GCS900 2D Grade Control System устанавливается на автогрейдеры (рисунок 1.5.1). В состав системы входят [195,252]:

- 1) Панель управления CB450 или CB460, на которой расположен цветной экран и ряд функциональных клавиш для управления и настройки рабочего процесса;
- 2) Блок питания Power Module;
- 3) Блок клапанов для модернизации штатной системы гидропривода Valve Module;
- 4) Датчик угла поворота отвала (угла захвата) RS400;
- 5) Два гироскопических датчика AS400, определяющих угол наклона в трех плоскостях, устанавливаемые на тяговую раму и хребтовую балку;

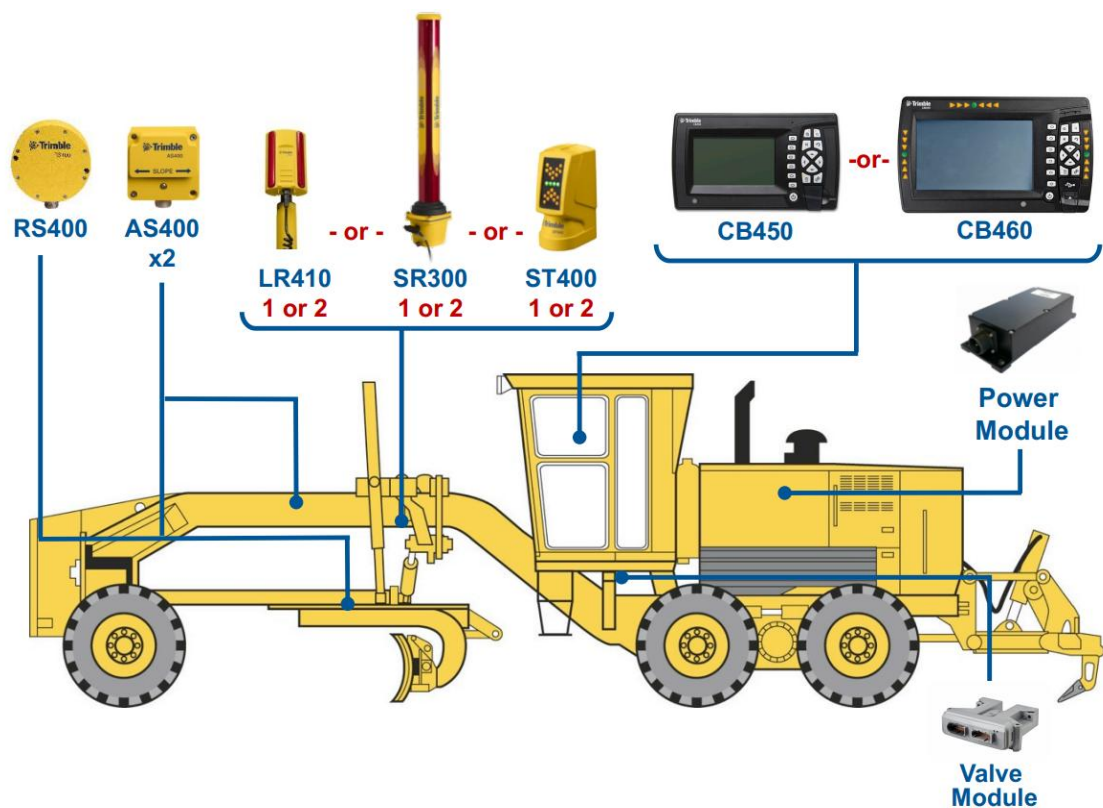


Рисунок 1.5.1 – Состав системы Trimble GCS900 2D Grade Control System [252]

- б) Один из трех типов датчиков высотного положения: приемник лазерного излучения LR410 (если система построена на лазерной технологии), лазерная рейка SR300 или ультразвуковой датчик ST400;

7) Лазерный построитель GL722 (в комплекте с LR410 или SR300, на рисунке не показан).

Система Trimble GCS900 3D Grade Control System устанавливается на автогрейдеры (рисунок 1.5.2). В состав системы входят [188,195,252]:

1) Панель управления CB450 или CB460, на которой расположен цветной экран и ряд функциональных клавиш для управления и настройки рабочего процесса;

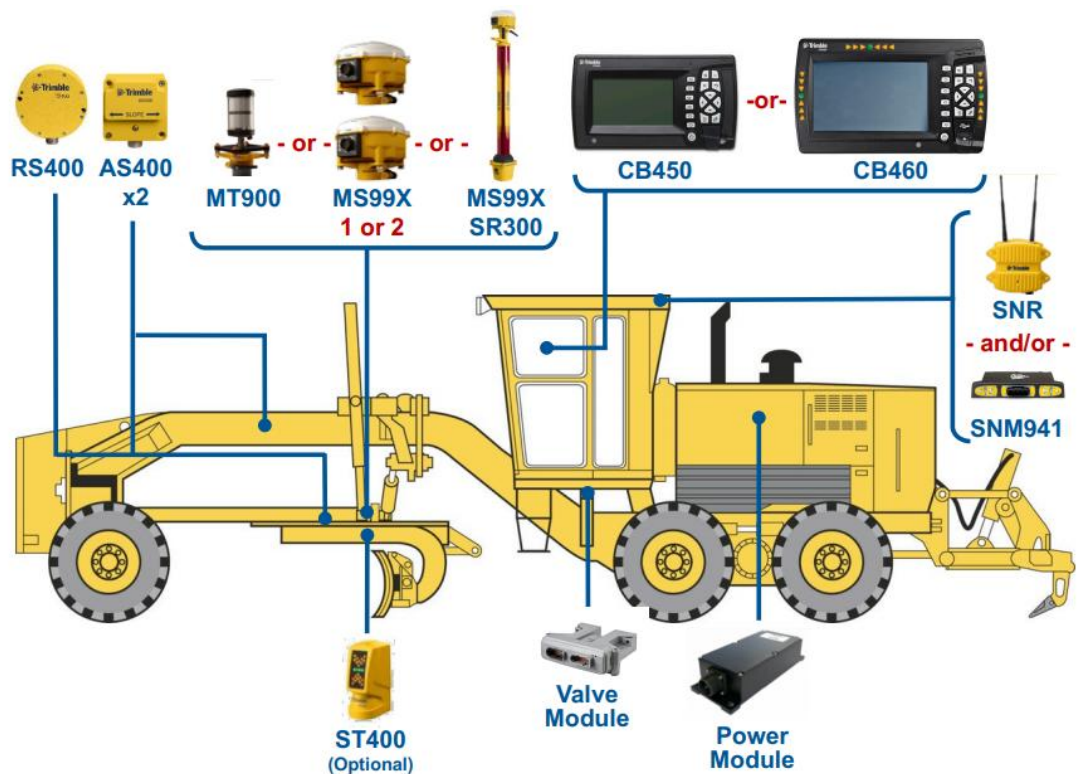


Рисунок 1.5.2 – Состав системы Trimble GCS900 3D Grade Control System [252]

- 2) Блок питания Power Module;
- 3) Блок клапанов для модернизации штатной системы гидропривода Valve Module;
- 4) Датчик угла поворота отвала (угла захвата) RS400;
- 5) Два гироскопических датчика AS400, определяющих угол наклона в трех плоскостях, устанавливаемые на тяговую раму и хребтовую балку;
- 6) Радиомодуль SNR или модем SNM941 для связи машины с базовой станцией;

7) Один из трех датчиков высотного положения: мишень MT900, одна или две ГНСС-антенны MS99X или лазерная рейка SR300 с установленной ГНСС-антенной MS99X;

8) Универсальная станция (роботизированный тахеометр) для систем с мишенью, лазерный построитель GL722 или базовая ГНСС-станция (в зависимости от типа датчика высотного положения) (на рисунке не показаны).

Система Leica iCON grade iGG2 2D Grader System устанавливается на автогрейдеры, бульдозеры (рисунок 1.5.3). В состав системы входят [188,245]:

- 1) Панель управления iCON iGD2;
- 2) Датчик угла поворота отвала (угла захвата) MRS130X;
- 3) Датчик угла наклона отвала MSS1300;

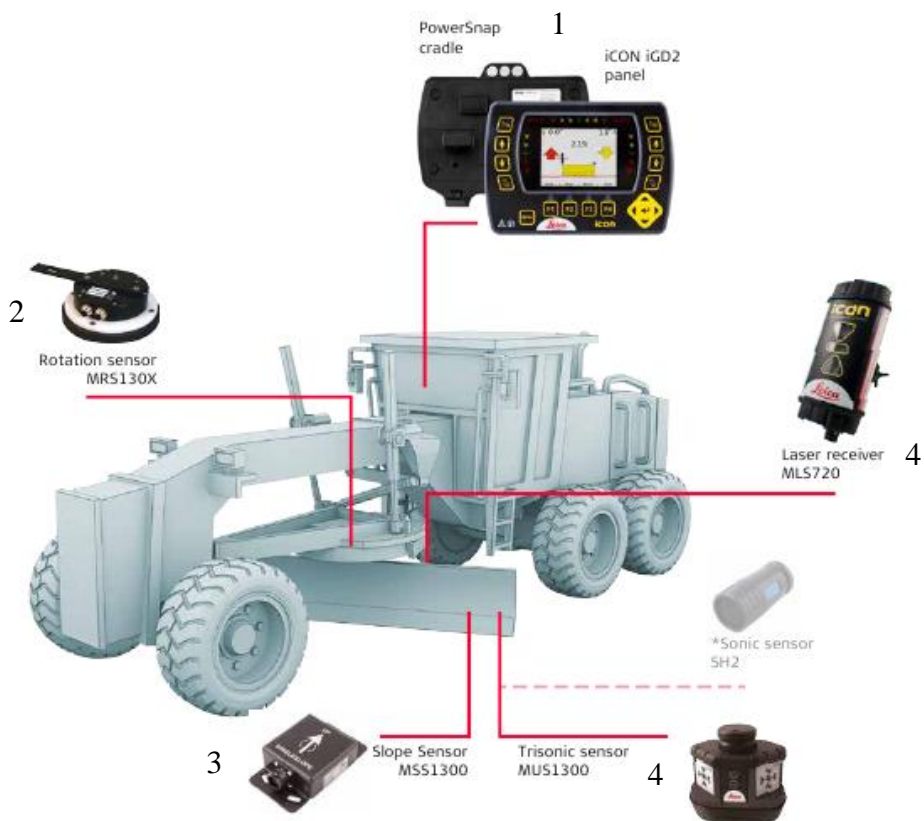


Рисунок 1.5.3 – Состав системы Leica iCON grade iGG2 2D Grader System [245]

4) Лазерный приемник MLS720 (есть вариант с двумя приемниками) или ультразвуковой датчик MUS1300 (в зависимости от задающего устройства);

5) Лазерный построитель плоскости (при использовании лазерных приемников) (на рисунке не показан).

Система Leica iCON grade iGG4 3D Grader System устанавливается на автогрейдеры, бульдозеры (рисунок 1.5.4). Работает в режиме Dual GNSS (работа на основе сигналов ГНСС). В состав системы входят [188,245]:

- 1) Панель управления MCP80 с монтажной станцией Docking station MDS Series;
- 2) Две ГНСС антенны CGA60;
- 3) ГНСС приемник iCON gps 82;
- 4) Датчик угла наклона отвала MSS1300;
- 5) Базовая станция ГНСС (на рисунке не показана).

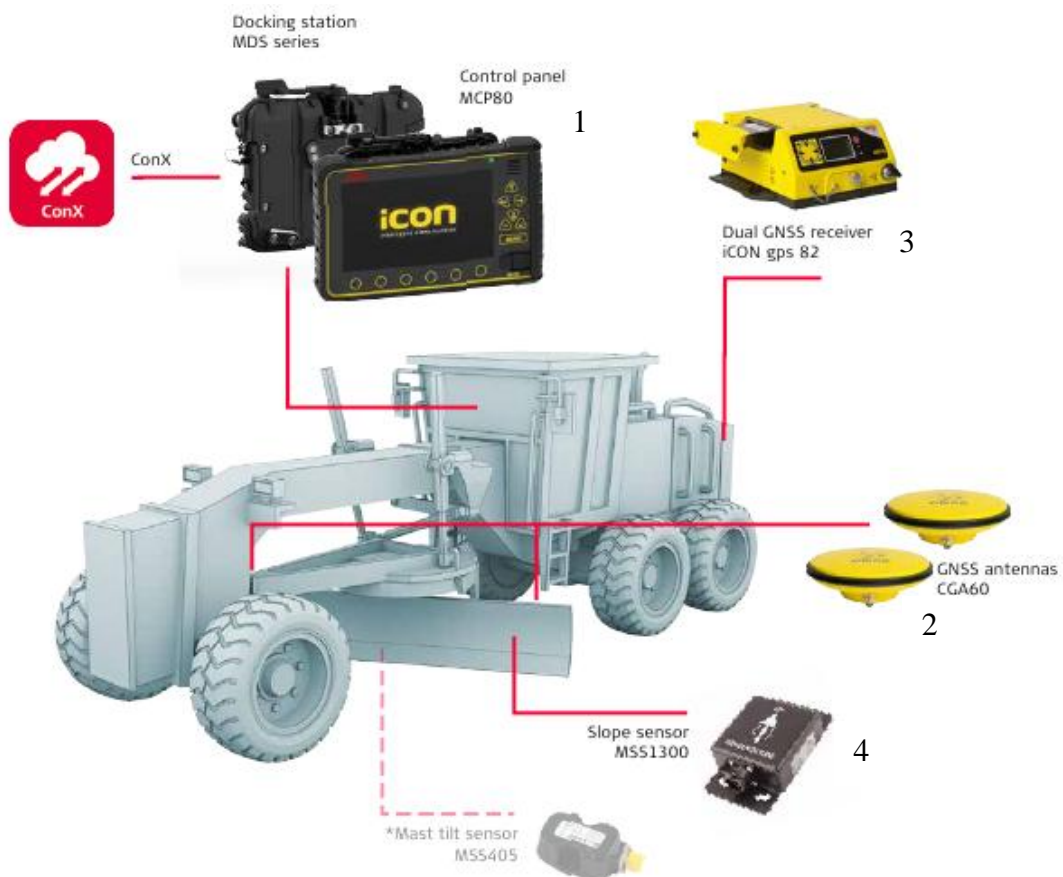


Рисунок 1.5.4 – Состав системы Leica iCON grade iGG4 3D Grader System [245]

Система TOPCON 2D System V (рисунок 1.5.5) для автогрейдеров может работать в режиме с ультразвуковым датчиком (при наличии опорной

поверхности) или с лазерными приемниками и построителем плоскости. Состав системы [188,247]:

- 1) Панель управления System Five;
 - 2) Датчик продольного наклона машины;
 - 3) Датчик поворота отвала (угла захвата);
 - 4) Датчик поперечного уклона;
 - 5) Джойстики управления Smart Knobs для ручного управления РО;
 - 6) Блок электромагнитных гидрораспределителей (пропорционального типа);
 - 7) Ультразвуковой датчик высоты ST-2;
- или
- 8) Приемник лазерного излучения 9130 Laser Tracker;
 - 9) Лазерный построитель плоскости (при использовании лазерного приемника) (на рисунке не показан).

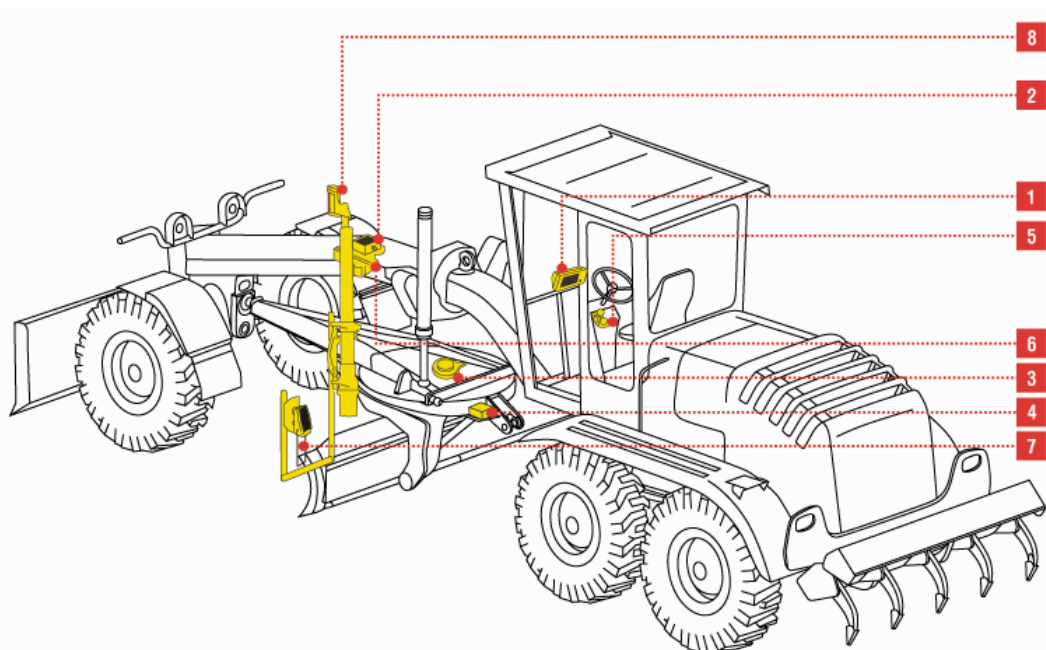


Рисунок 1.5.5 – Состав системы TOPCON 2D System V [247]

Система TOPCON 3D LPS (рисунок 1.5.6) на основе использования роботизированного тахеометра. Недостатком системы является ограничение на работу: одна машина – один тахеометр. Состав системы [247]:

- 1) Панель управления GX-55;

- 2) Блок управления MC-R3;
- 3) Круговая призма A7R-MC;
- 4) Датчик продольного наклона машины;
- 5) Датчик поворота отвала (угла захвата);
- 6) Датчик поперечного уклона;
- 7) Блок электромагнитных гидрораспределителей (пропорционального типа);
- 8) Антенна LPS;
- 9) Джойстики управления Smart Knobs для ручного управления рабочим органом;
- 10) Роботизированный электронный тахеометр Topcon GT (могут быть использованы тахеометры серии PS).

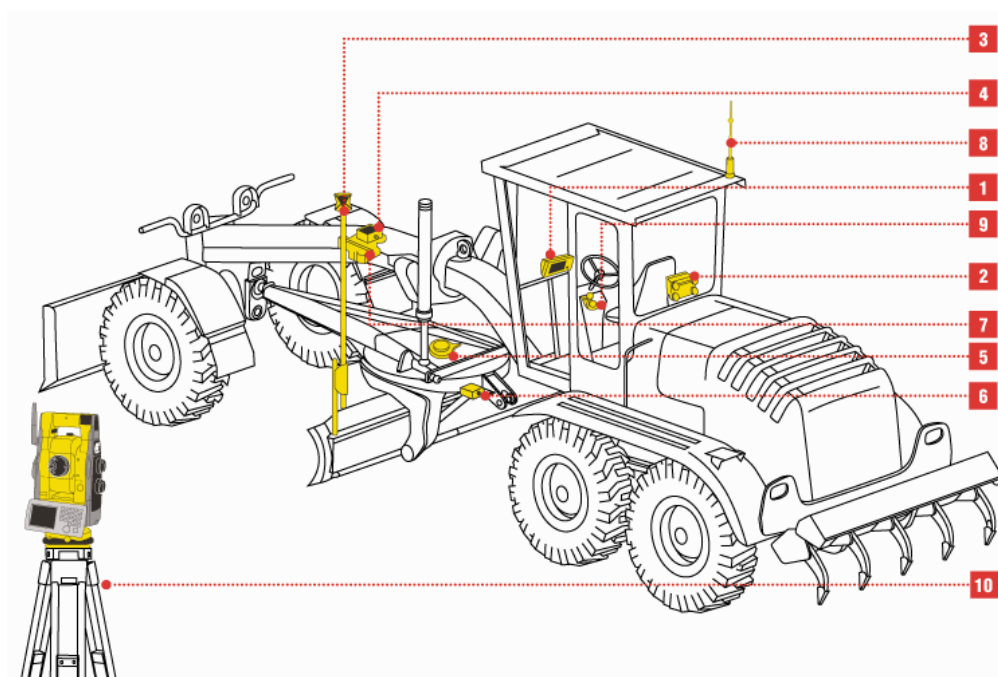


Рисунок 1.5.6 – Состав системы TOPCON 3D LPS [247]

Тахеометр (рисунок 1.5.7) используется для постоянного отслеживания круговой призмы, установленной на машине, с целью определения ее текущих координат. Он является геодезическим инструментом для измерения расстояния, горизонтальных и вертикальных углов до круговой призмы. Отслеживание

ведется на всем протяжении работы системы на машине, при этом оптическая система тахеометра благодаря электроприводу всегда направлена на призму.



Рисунок 1.5.7 – Роботизированный электронный тахеометр Topcon GT [247]

Система TOPCON 3D ГНСС (рисунок 1.5.8) на основе использования сигналов спутниковых систем. Состав системы [247]:

- 1) Панель управления GX-55;
- 2) Блок управления MC-R3;
- 3) ГНСС антенна (в одно- или двухмачтовом исполнении), так же возможна установка двойной антенны (технология TWIN);
- 4) Датчик продольного наклона машины;
- 5) Датчик поворота отвала (угла захвата);
- 6) Датчик поперечного уклона;
- 7) Джойстики управления Smart Knobs для ручного управления рабочим органом;
- 8) Блок электромагнитных гидрораспределителей (пропорционального типа);
- 9) Радиоантенна;
- 10) Базовая станция ГНСС для передачи RTK поправок (подробнее в пп. 1.7) в бортовой компьютер машины (на рисунке не показаны).

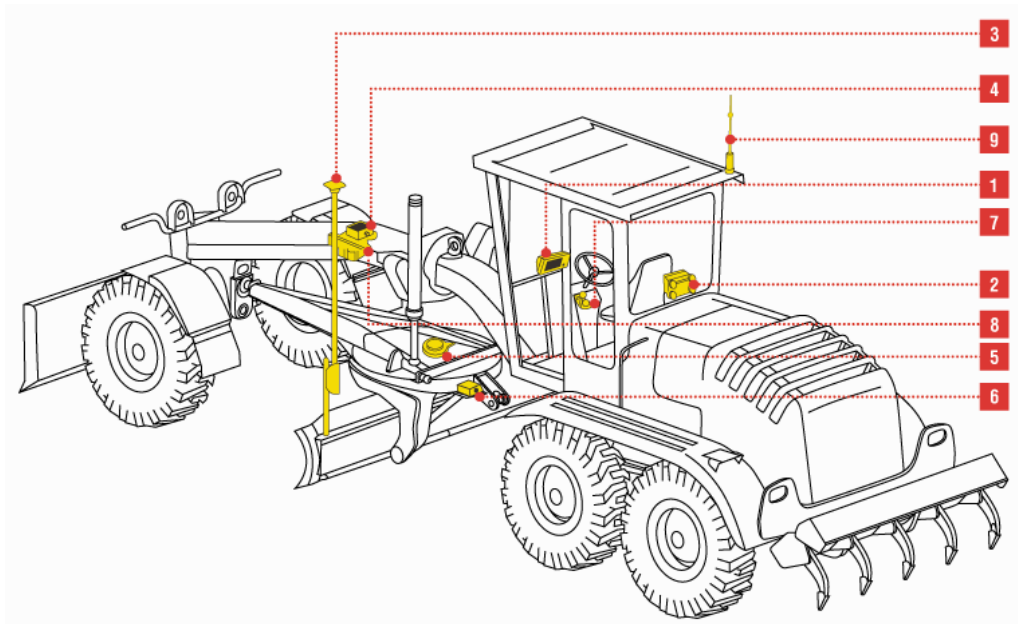


Рисунок 1.5.8 – Состав системы TOPCON 3D ГНСС [247]

Система TOPCON 3D mmGPS (рисунок 1.5.9) для грейдеров – одна из новейших разработок. Является модернизацией системы 3D ГНСС. На базовую станцию дополнительно устанавливается построитель лазерной зоны PZL-1 или LZ-T5, а на рабочий орган крепится датчик лазерной зоны PZS-МС. Данная модернизация позволяет улучшить точность работы системы с 2-3 см до 7-8 мм [188,247].

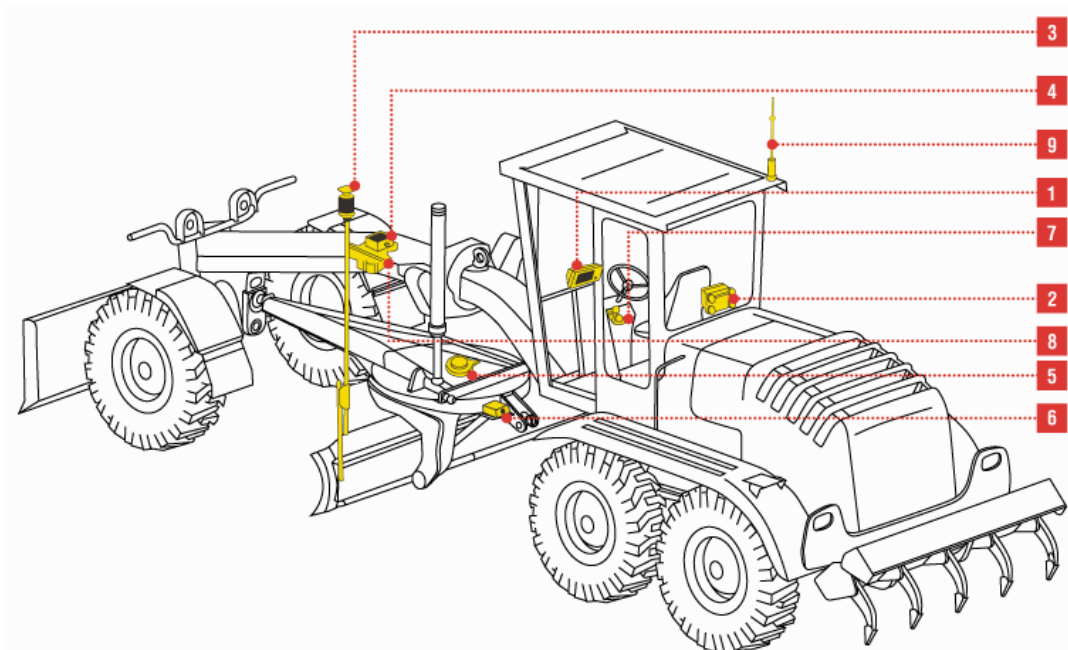


Рисунок 1.5.9 – Состав системы TOPCON 3D mmGPS [247]

Все представленные системы легко модернизируются в более сложные путем подключения необходимых компонентов, дающих дополнительные информационные параметры, и внедрения усовершенствованных алгоритмов управления [188,195,233,234,235].

Помимо СУ каждая компания разрабатывает и поставляет собственные облачные программные комплексы, позволяющие проектировать, редактировать, визуализировать и использовать в работе 3D модели земляных сооружений. Такие как Trimble Business Center, Leica ConX и SiteLink 3D [188,195,245,247,252].

На территории СНГ ООО «Белгидросила-Групп» (г. Минск) производит систему нивелирования для автогрейдеров и асфальтоукладчиков САУРО. Данная система является 2D-системой на основе одного или двух щуповых датчиков высоты, опирающихся на репер (струна, бордюр). Система оснащается одним или двумя датчиками уклона [188,195,243].

Анализ современных СУ показал, что они отвечают современным требованиям точности и успешно применяются при строительстве инженерных сооружений. Рассмотренные СУ можно разбить на 3 класса по выполняемым функциям (таблица 1.3) [188,195].

Таблица 1.3

Классификация систем управления ДСМ

Функции систем \ Класс систем	Системы управления 1D	Системы управления 2D	Системы управления 3D	Системы автономного управления 4D
Управление высотной координатой РО	+	+	+	+
Управление углом поперечного уклона РО	-	+	+	+
Контроль координат ДСМ на площадке	-	-	+	+
Управление курсом и скоростью движения ДСМ	-	-	-	+
Создание «цифрового двойника» сооружения	-	-	-	+

Следует отметить, что все известные СУ ДСМ осуществляют управление РО, в то время как управление курсом и скоростью движения машины остается задачей оператора. Задача разработки перспективных систем автономного

управления ДСМ нового класса (таблица 1.3), которые помимо управления РО смогут управлять движением машины по требуемой траектории при выполнении технологических операций, до настоящего времени не решена и остается актуальной проблемой [188,195].

1.6. Методика оценки эффективности работы автономных дорожно-строительных машин

Под эффективностью рабочего процесса любой ДСМ понимается нормированный по отношению к затратам материальных ресурсов результат действия машины на определенном интервале времени [100,232].

При формировании показателей эффективности необходимо, чтобы они обеспечивали [100,232]:

- отражение влияния на эффективность машины всего многообразия факторов: технических параметров, эксплуатационных и производственных условий и т.д.;

- получение обоснованных рекомендаций для выбора рациональных технических параметров машины и ее СУ, совокупность которых определяет ее технико-экономическую эффективность.

Кроме того, показатели эффективности должны удовлетворять следующим требованиям [100,232]:

- иметь технико-экономическую основу;
- соответствовать цели, достигаемой в результате применения оборудования;

- иметь иерархическую структуру, обеспечивая включение частных показателей в более общие.

Для оценки эффективности ДСМ целесообразно использовать систему показателей, сформулированных на базе такого обобщенного показателя как приведенные удельные затраты, который с учетом соответствующих ограничений

наиболее полно отвечает рассмотренным требованиям, и позволяет оценить эффективность как в сфере производства, так и в сфере эксплуатации [100,232].

Приведенные удельные затраты на единицу продукции [100,232]:

$$Z_{пр. уд} = C_{уд} + E k_{уд}, \quad (1.6.1)$$

где $C_{уд} = C_{мс} / P_{см}$ – себестоимость единицы продукции; $C_{мс}$ – себестоимость машиносмены; $P_{см}$ – эксплуатационная производительность машины в смену; $k_{уд} = Ц / T_{см} P_{см}$ – удельные капитальные затраты, т.е. сумма производственных основных фондов на единицу годового выпуска продукции; E – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, характеризующий средний размер экономии от снижения себестоимости продукции, приходящийся на 1 руб. дополнительных капиталовложений; $Ц$ – расчетная стоимость машины; $T_{см}$ – число смен работы машины в году в соответствии с установленным режимом работы.

Для показателей эффективности характерна иерархическая структура построения, с точки зрения охвата параметров, определяющих протекание процесса с включением частных показателей более низкого уровня, в более общие (таблица 1.4) [100,232].

Показатель первого уровня применяется для оценки комплексов систем и машин, если известно, что коэффициенты удельных приведенных затрат для сравниваемых объектов существенно разнятся [100,232].

Показатель второго уровня применяется для тех же целей, что и показатель первого уровня, но при условии, что для нового объекта коэффициенты приведенных затрат на эксплуатацию и основные фонды не значительно отличаются от эталонных [100,232].

Показатели третьего уровня оценивают основные группы подсистем. При этом важнейшим показателем является эксплуатационная производительность, так как все показатели более высокого уровня не могут быть определены без известного значения этого показателя [100,232].

Таблица 1.4

Система моделей для оценки эффективности ДСМ и отдельных рабочих процессов [100,232]

Уровень модели (оценки)	Показатель	Назначение модели		Применение
		Оценка по абсолютной величине показателя	Оценка по относительной величине и выявление областей применения	
I	Приведенные удельные затраты с учетом сопряженного эффекта, оценивающие эффект применения подсистемы в системе более высокого уровня	$Z_{np,y\delta\Sigma} = C_{y\delta\Sigma} + Ek_{y\delta\Sigma}$	$k_{z\Sigma} = \frac{3_{z\Sigma}}{3_{zj}}$	Оптимизация систем и установление областей применения машин и комплексов в условиях эксплуатации
II	Приведенные удельные затраты на единицу продукции	$Z_{np,y\delta} = C_{y\delta} + Ek_{y\delta}$	$k_z = \frac{3_i}{3_j}$	
III	Обобщенный показатель по энергоемкости и материалоемкости	$\Pi_{NG} = \frac{N_{y\delta}}{\Pi_{m,y\delta}}$	$k_{NG} = \frac{\Pi_{NGi}}{\Pi_{NGj}}$	Оптимизация параметров и режимов эксплуатации
IV	Материалоемкость	$G_{y\delta} = \frac{G}{\Pi_m}$	$k_G = \frac{G_{y\delta i}}{G_{y\delta j}}$	То же
	Энергоемкость	$N_{y\delta} = \frac{N}{\Pi_m}$	$k_N = \frac{N_{y\delta i}}{N_{y\delta j}}$	
	Производительность	$\Pi_m = \frac{q}{t_u}$	$k_n = \frac{\Pi_{mi}}{\Pi_{mj}}$	
	Время цикла	$t_u = \sum t_k$	$k_t = t_{ui} / t_{uj}$	
V	Коэффициент полезного действия	η	$k_\eta = \eta_i / \eta_j$	То же
	Энергоемкость частной операции	k_p	$k_{kp} = k_{pi} / k_{pj}$	
VI	Мощность	N	$k_N = N_i / N_j$	То же
	Энергия	A	$k_A = A_i / A_j$	
VII	Сила сопротивления	W	$k_W = W_i / W_j$	То же
	Скорость	V	$k_V = V_i / V_j$	
	Глубина копания и др.	h	$k_h = h_i / h_j$	

Показатели четвертого и пятого уровней характеризуют отдельные параметры РП и позволяют определить их влияние на эффективность РП при остальных неизменных параметрах, входящих в показатели более высокого уровня [100,232].

Так как часть показателей, входящих в состав удельных приведенных затрат, может быть установлена весьма приблизительно, целесообразней применять показатели более низкого уровня [100,232].

Эксплуатационная производительность ДСМ, выполняющей планировочные работы можно представить как [105,229,232]

$$P_{\text{э}} = 3600 \cdot V \cdot b \cdot n^{-1} \text{ м}^2/\text{ч}, \quad (1.6.2)$$

где b_3 – ширина отвала, м ; n – число проходов по обрабатываемому участку до достижения требуемой точности; V – рабочая скорость движения машины, м/с.

Таблица 1.5

СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85 [181]

1 Высотные отметки по оси	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до ± 20 мм, остальные - до ± 10 мм
2 Поперечные уклоны	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонение от проектных значений до $\pm 0,01$, остальные - до $\pm 0,005$
3 Ширина слоя 3.1 Основания и покрытия асфальтобетонные, цементобетонные 3.2 Все остальные типы оснований и покрытий	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений от минус 7,5 см до 10 см, остальные - до ± 5 см Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до ± 10 см, остальные - от минус 5 см до плюс 10 см
6 Ровность (просвет под рейкой длиной 3 м) 6.1 Основания и покрытия асфальтобетонные, монолитные цементобетонные, из каменных материалов и грунтов, обработанных вяжущими 6.2 Все остальные виды покрытий и оснований	Не более 5% результатов определений могут иметь значения до 6 мм, остальные до 3 мм Не более 5% результатов определений могут иметь значения до 15 мм, остальные до 7 мм

СНиП 3.06.03-85 Автомобильные дороги. ПАРАМЕТРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ОЦЕНКЕ
КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНЫХ РАБОТ, И УСЛОВИЯ ИХ ОЦЕНКИ [183]

Конструктивный элемент, вид работ и контролируемый параметр	Условия оценки на
	"отлично"
1. Земляное полотно	
1.2. Возведение насыпей и разработка выемок	
1.2.2. Высотные отметки продольного профиля	Не более 5% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах до ± 100 (20) мм, остальные - до ± 50 (10) мм
1.2.3. Расстояния между осью и бровкой земляного полотна	Не более 5% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах до ± 20 см, остальные - до ± 10 см
1.2.4. Поперечные уклоны	Не более 5% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 0,015 (минус 0,010) до 0,030 (0,015), остальные - до $\pm 0,010$ (0,005)
1.2.5. Уменьшение крутизны откосов	Не более 5% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах до 20%, остальные - до 10%
2. Основания и покрытия дорожных одежд	
2.1. Высотные отметки по оси	Не более 5% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах до ± 100 (20) мм, остальные - до ± 50 (10) мм
2.2. Ширина слоя*	
2.2.1. Цементобетонные основания и покрытия, мостовые	Не более 5% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 7,5 до 10 см, остальные - до ± 5 см
2.2.2. Все остальные типы оснований и покрытий	Не более 5% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 15 до 20 см, остальные - до ± 10 см
2.3. Толщина слоя	
2.3.1. Асфальтобетонные основания и покрытия	Не более 5% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 15 до 20 мм, остальные - до ± 10 мм
2.3.2. Все остальные типы оснований и покрытий	Не более 5% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 22 (минус 15) до 30 (20) мм, остальные - до ± 15 (10) мм
2.4. Поперечные уклоны	Не более 5% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 0,015 (минус 0,010) до 0,030 (0,015), остальные - до $\pm 0,010$ (0,005)
2.5. Ровность* (просвет под рейкой длиной 3 м)	
2.5.4. Асфальтобетонные и монолитные цементобетонные основания и покрытия	Не более 2% результатов определений могут иметь значения просветов в пределах до 10 (6) мм, остальные - до 5 (3) мм

Одним из параметров, входящих в формулу (1.6.2) является точностной параметр. Требования к точности СУ ДСМ выбираются с учетом требований нормативных документов: СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги [181], СНиП 3.06.03-85 Автомобильные дороги [183,195].

Для проектирования СУ следует выбирать наиболее жесткие требования, применяемые к автомобильным дорогам I категории (таблицы 1.5, 1.6).

Мировые производители автоматизированных СУ ДСМ (Topcon, Trimble, Leica и др.) указывают в характеристиках своих систем точность по высотным отметкам $\pm 3-5$ мм [64,195,245,247,252].

Таким образом, перспективная СУ ДСМ должна обеспечивать точность по высоте ± 3 мм, точность в плане – ± 3 см, точность по уклону – $\pm 0,003$.

Исходя из цели работы, в качестве критерия эффективности движения ДСМ по заданной траектории был выбран интегральный критерий эффективности.

Основная цель движения ДСМ – это перемещение РО в соответствие с проектом земляного сооружения. Соответственно, в качестве критерия эффективности выбранного метода управления следует использовать отклонение центральной точки РО от заданной траектории [190,192,195,196,202,240].

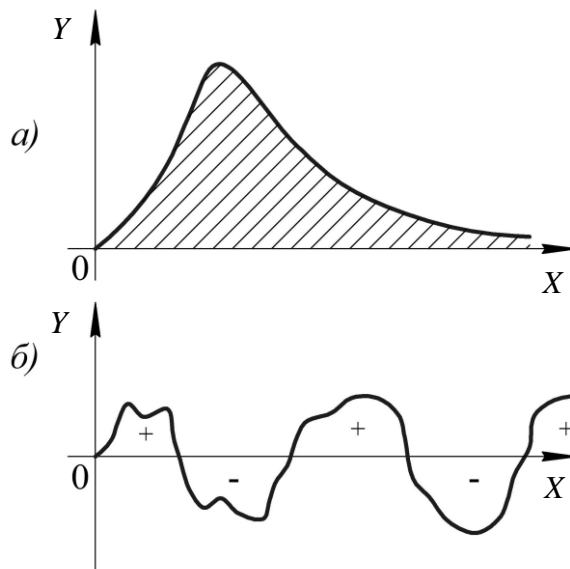


Рисунок 1.6.1 – Интегральный критерий эффективности

Количественно такой параметр можно оценить с помощью интегрального показателя, т.е. площади между заданной траекторией и траекторией движения центральной точки РО [190,192,195,196,202]

$$E_T = \int_0^{\infty} |\Delta y(x)| dx, \quad (1.6.3)$$

где $\Delta y = y(\infty) - y(x)$ – отклонение траектории движения центральной точки РО от значения $y(\infty)$, которое соответствует заданной траектории [190,192,195,196,202].

Критерий E_T геометрически представляет собой заштрихованную площадь на рисунок 1.6.1,а. Переходный процесс, показанный на рисунке 1.6.1,а, вызван возмущением, например, ступенчатым изменением заданной траектории. Чем меньше заштрихованная площадь, тем предпочтительнее переходный процесс [190,192,195,196,202].

Этот интегральный критерий может быть использован не только для оценки качества управления, но и при синтезе СУ для оптимизации варьируемых параметров. Абсолютное значение критерия E_T при этом не так важно. Используя готовые выражения для E_T и передаточные функции системы можно получить зависимости критерия E_T от варьируемых параметров СУ и найти их оптимальные значения [190,192,195,196,202].

Интегральный критерий E_T при использовании модуля можно применять к системам, у которых переходные процессы обладают колебательностью и меняют знак (рисунок 1.6.1,б) [190,192,195,196,202].

Можно использовать и более сложные интегральные критерии, основанные на второй и следующих производных от Δy . Их применение приблизит переходные процессы к кривым второго и более высоких порядков [190,192,195,196,202].

Помимо этого при проектировании перспективной СУ необходимо учитывать корректность работы самой СУ. В качестве критерия эффективности СУ был дополнительно выбран показатель перерегулирования переходного процесса СУ [108,129,240].

1.7. Принципы формирования информационных параметров на основе сигналов глобальных навигационных спутниковых систем

1.7.1. Общие сведения

Сетевая структура спутниковой радионавигационной системы (СРНС) ГЛОНАСС включает в себя три основные подсистемы [67,79,175,230] (рисунок 1.7.1):

- подсистема космических аппаратов (ПКА), состоящая из навигационных спутников (космический сегмент);
- подсистема контроля и управления (ПКУ) (наземный командно-измерительный комплекс или сегмент управления);
- навигационная аппаратура потребителей (НАП) СРНС (сегмент потребителей).

В последнее время в структуру СРНС часто включают еще одну подсистему, которую называют функциональным дополнением СРНС (рисунок 1.7.1). Данная подсистема позволяет расширить функциональные возможности СРНС и улучшить ее потребительские характеристики [67,175,179,230].

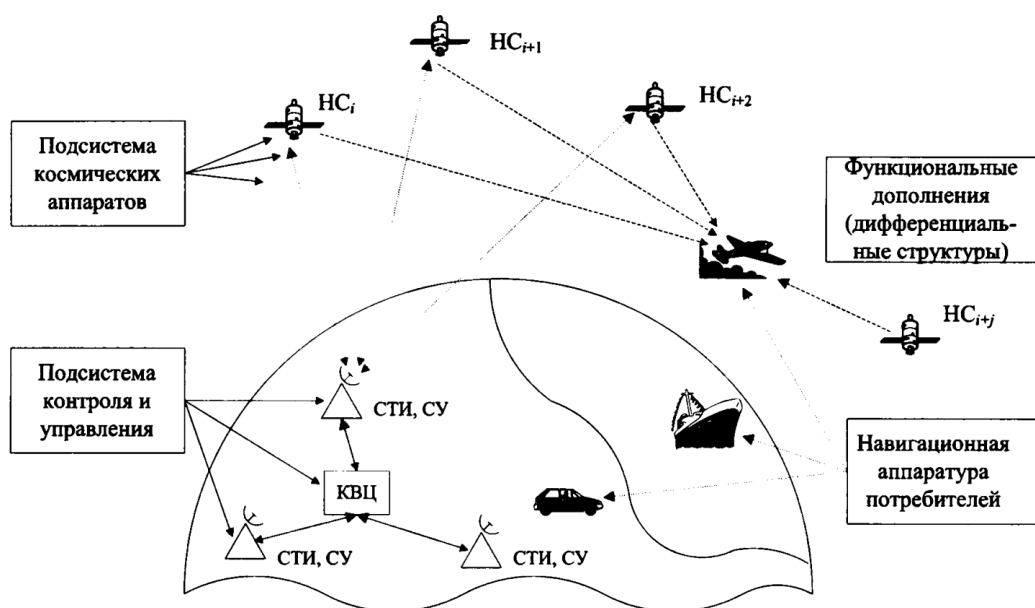


Рисунок 1.7.1 – Глобальная спутниковая радионавигационная система [67,230]

1.7.2. Подсистема космических аппаратов

ПКА СРНС состоит из определенного числа навигационных спутников (НС) (штатно 24 НС). Основные функции НС – формирование и излучение радиосигналов, необходимых для навигационных определений потребителей СРНС, контроля бортовых систем спутника подсистемой контроля и управления СРНС. В состав аппаратуры НС включают радиотехническое оборудование (передатчики навигационных сигналов и телеметрической информации, приемники данных и команд от ПКУ, антенны, блоки ориентации), ЭВМ, бортовой эталон времени и частоты (БЭВЧ), солнечные батареи и т.д. Бортовые эталоны времени и частоты обеспечивают практически синхронное излучение навигационных сигналов всеми спутниками, что необходимо для реализации режима пассивных дальномерных измерений в аппаратуре потребителей [29,67,230].

Навигационные сигналы спутников позволяют точно измерять дальность и доплеровское смещение частоты, содержат информацию о параметрах движения НС и некоторую дополнительную (служебную) информацию [67,79,179,230].

1.7.3. Подсистема контроля и управления

Наземная ПКУ выполняет следующие основные задачи [67,79,179,230]:

- эфемеридное и частотно-временное обеспечение НС;
- мониторинг радионавигационного поля;
- радиотелеметрический мониторинг НС;
- командное и программное радиоуправление функционированием НС.

Под эфемеридным обеспечением понимают определение и прогноз параметров движения всех НС с помощью наземных средств и передачу этой информации («закладка») на НС с целью ее последующей передачи в навигационном сообщении потребителям [67,179,230].

Частотно-временное обеспечение означает определение и прогноз отклонений бортовых шкал времени НС от системной шкалы времени и «закладка» на борт НС частотно-временных поправок (ЧВП) с целью последующей их передачи в навигационном сообщении потребителям [67,179,230,241].

Мониторинг радионавигационного поля в ПКУ осуществляется с целью обеспечения потребителей навигационными радиосигналами гарантированного качества, реализующими требуемую точность навигационно-временного обеспечения (НВО) [67,179,230].

При штатной комплектации ПКУ состоит из координационно-вычислительного центра (КВЦ), станций траекторных измерений и управления (СТИ), системного (наземного) эталона времени и частоты.

Синхронизация различных процессов в СРНС обеспечивается с помощью высокостабильного (атомного) системного эталона времени и частоты, который используется, в частности, в процессе юстировки бортовых эталонов времени и частоты НС СРНС [67,230].

1.7.4. Навигационная аппаратура потребителей

НАП предназначена для приема и обработки радиосигналов НС с целью определения необходимой потребителям информации (пространственно-временных координат, направления и скорости, пространственной ориентации и т.п.). В состав НАП входят антенна с равномерной диаграммой направленности в верхнюю полусферу; высокочастотный приемник, осуществляющий фильтрацию и разделение сигналов, и вычислитель, решающий задачу НВО. Обычно используют двухэтапное решение задачи НВО. На первом этапе формируют оценки параметров радиосигнала – задержки и доплеровского смещения частоты и извлекают из сигнала навигационное сообщение, содержащее, в том числе, информацию о параметрах движения НС. На втором этапе рассчитывают координаты потребителя и составляющие его вектора скорости [67,210,230].

В зависимости от типа НАП (носимая человеком, авиационная, морская, автомобильная, геодезическая и т.д.) в ней реализуются дополнительные сервисные функции, например, привязка к карте местности, движение по заданному маршруту, определение положения потребителя относительно заданной точки и др. [67,210,230].

1.7.5. Система координат, используемая в спутниковой радионавигационной системе ГЛОНАСС

Эфемеридная информация, передаваемая потребителям ГЛОНАСС в составе служебной информации конкретного НС, содержит координаты фазового центра передающей антенны данного НС в геоцентрической системе координат ПЗ-90. Эта система координат, как и принятая в СРНС GPS система координат WGS-84, является декартовой системой координат, связанной с Землей, т.е. ее центр «О» находится в центре масс Земли, ось OZ направлена к Северному полюсу, плоскость XOY лежит в плоскости экватора, а ось OX лежит в плоскости Гринвичского меридиана. До 1993 г. в СРНС ГЛОНАСС использовалась система координат СГС-85 [29,67,68,230].

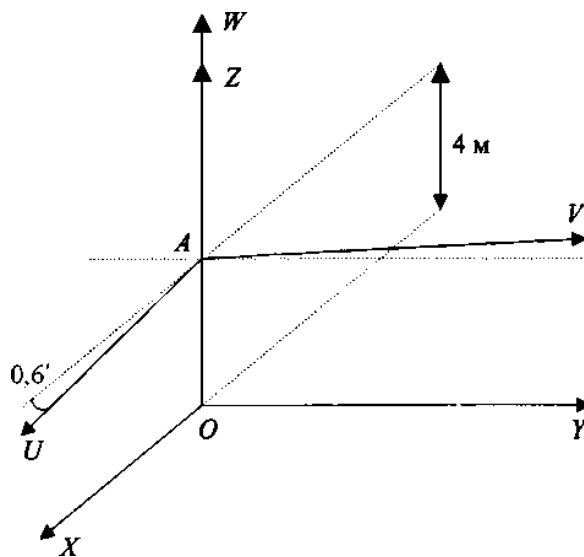


Рисунок 1.7.2 – Системы координат ПЗ-90, WGS-84 [29,67,230]

Системы координат ПЗ-90 (OXYZ) и WGS-84 (AUVW) различаются в некоторых важных параметрах, которые принято сводить к повороту системы относительно оси Z или Y и смещению начала координат (рисунок 1.7.2).

Соотношения, характеризующие переход от координат в системе ПЗ-90 к системе WGS-84, можно представить в виде [68,230]

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 4\text{м} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & -3 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 3 \cdot 10^{-6} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}. \quad (1.7.1)$$

Смещение координат точки на земной поверхности в двух указанных системах координат оценивается по результатам измерений как не превышающее 15 м (в среднем 5 м).

В 2008 году в системе ГЛОНАСС была введена модернизированная версия системы координат: ПЗ-90.02 (Распоряжение Правительства РФ от 20.06.07 № 797/Р).

Преобразование координат из системы ПЗ-90 в систему ПЗ-90.02

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\text{ПЗ-90.02}} = \begin{pmatrix} 1 - 0,22 \cdot 10^{-6} \\ 0,6303 \cdot 10^{-6} \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -0,6303 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0,6303 \cdot 10^{-6} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\text{ПЗ-90}} + \begin{pmatrix} -1,07 \\ -0,03 \\ 0,02 \end{pmatrix}. \quad (1.7.2)$$

Обратное преобразование координат из системы ПЗ-90.02 в систему ПЗ-90

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\text{ПЗ-90}} = \begin{pmatrix} 1 + 0,22 \cdot 10^{-6} \\ -0,6303 \cdot 10^{-6} \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0,6303 \cdot 10^{-6} & 0 \\ -0,6303 \cdot 10^{-6} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\text{ПЗ-90.02}} + \begin{pmatrix} -1,07 \\ -0,03 \\ 0,02 \end{pmatrix}. \quad (1.7.3)$$

1.7.6. Требования различных потребителей к спутниковым радионавигационным системам

Основные требования к навигационному обеспечению различных гражданских объектов, реализуемому с помощью СРНС, в РФ сформулированы, обобщены и приведены в Радионавигационном плане Российской Федерации [228]. Они учитывают также положения документов таких международных

организаций, как ИКАО (Международная организация гражданской авиации), ИМО (Международная морская организация), а также ряда национальных радионавигационных планов других стран, например, США [230].

Основной интерес в данной работе представляют требования наземных потребителей, к числу которых относятся ДСМ [67,210,230]:

- операции транспорта специальной техники дорожных служб требуют точности 5 м в городах и 10 м на автодорогах;

- обеспечение строительно-планировочных и дорожных работ в городах и на автодорогах требуют геодезической точности 0,02...0,05 м, которая должна реализовываться с использованием специальной навигационной аппаратуры, работающей как с сигналами ГНСС, так и с сигналами их функциональных дополнений.

Эти параметры указывают, что непосредственная спутниковая навигация в стандартном режиме использования ГНСС ГЛОНАСС/GPS/ГАЛИЛЕО является основным методом, используемым в дорожном хозяйстве и строительстве.

1.7.7. Способы повышения точности работы ГНСС

RTK (Real Time Kinematic) – это набор способов и методов для значительного повышения точности определения координат до миллиметровой точности, полученных с использованием ГНСС. Это метод кинематического измерения, в котором два приемника GPS и/или ГЛОНАСС имеют линию связи для передачи и приема данных между ними. Один приемник неподвижный с заданными координатами и называется опорным или базовым, а другой – подвижный [242].

В RTK используется двухчастотное оборудование. Передаваемые данные являются измерениями фазовой коррекции в реальном времени для мобильного приемника ГНСС. Делается допущение, что в случае размещения приемников в непосредственной близости и примерно на одной высоте, погрешности измерения координат будут одинаковы для обоих. Координаты базового приемника заранее известны с высокой точностью и на основе измеренных координат базовый

приемник вычисляет поправки к координатам и передает их на мобильное устройство. В последнее время в ряде стран строятся постоянные станции и сети для RTK. Через них любой оператор, поддерживающий приемник ГНСС, может воспользоваться услугами RTK в диапазоне базовых станций [242].

Другим распространенным способом повышения точности является дифференциальный метод измерения в реальном времени (DGNSS). При таком способе также используют два приемника: базовый в точке с известными координатами и мобильный [242].

В режиме DGNSS измеряют не абсолютные координаты мобильного приемника, а его положение относительно базового (вектор базы). Использование дифференциального режима позволяет довести точность кодовых измерений до десятков сантиметров, а фазовых - до единиц миллиметров. Наилучшие показатели имеют фазовые двухчастотные приемники. Они отличаются от фазовых одночастотных более высокой точностью, более широким диапазоном измеряемых векторов баз и большей скоростью и устойчивостью измерений [242].

Навигационные данные необходимы для целей эффективного управления ДСМ как в автономном режиме, так и в режиме внешнего управления.

Автономное управление на наземном транспорте используется в настоящее время, как правило, только в легковых автомобилях. Использование систем автономного управления ДСМ позволит существенно повысить точность выполнения работ и снизить их себестоимость.

1.8. Цель и задачи исследования

Проведенный анализ предшествующих теоретических и экспериментальных исследований позволил сделать следующие выводы:

1) Существует достаточно большое количество исследований, посвященных совершенствованию ДСМ и их СУ.

2) Исследования, направленные на повышение точности работ, выполняемых ДСМ, можно разделить на две группы:

- работы по совершенствованию конструктивных параметров ДСМ;
- работы по совершенствованию СУ ДСМ.

3) Конструктивные параметры ДСМ не проявляют заметных тенденций к изменению, дальнейшее повышение точности работ связано с внедрением СУ ДСМ.

4) Повышение эффективности работ, выполняемых ДСМ, возможно путем дальнейшего совершенствования СУ.

5) Существующие СУ предназначены для поддержания заданных высотных и угловых параметров РО относительно опорной поверхности. Однако проект земляного сооружения подразумевает различные высотные и угловые параметры полотна в разных точках проекта. Таким образом, появляется актуальная задача определения координат ДСМ в 3D-режиме на строительной площадке в режиме реального времени. Путем решения данной задачи решается также и важнейшая задача по определению рациональной траектории движения ДСМ по площадке и управления движением ДСМ по заданной траектории, что позволит полностью исключить ЧО из рабочего процесса ДСМ и, следовательно, повысит общую эффективность работы.

Цель работы: решение научной проблемы повышения эффективности работы колесных ДСМ путем разработки научных основ и методов автономного управления.

Объект исследования: рабочий процесс формирования земляного сооружения колесной ДСМ, оснащенной системой автономного управления.

Предмет исследования: закономерности, устанавливающие связь между конструктивными и эксплуатационными параметрами колесной ДСМ, параметрами системы автономного управления и критерием эффективности.

Задачи исследования:

1. Предложить концепцию автономного управления колесными ДСМ на основе классификации ДСМ, анализа рабочего процесса и идентификации

функций ЧО.

2. Провести классификацию существующих СУ ДСМ и определить перспективы создания систем нового класса.

3. Предложить методику оценки эффективности работы колесной ДСМ, оснащенной системой автономного управления.

4. Разработать математическую модель сложной динамической системы рабочего процесса колесной ДСМ, оснащенной системой автономного управления, позволяющую моделировать требуемые траектории движения ДСМ при формировании земляного полотна с различным расположением РО.

5. Разработать методологию автономного управления и построения траекторий движения с учетом кинематических ограничений колесных ДСМ.

6. Установить зависимости между конструктивными, эксплуатационными параметрами ДСМ, параметрами системы автономного управления и критерием эффективности при формировании земляного полотна колесной ДСМ.

7. Сформулировать практические рекомендации и технические решения для создания перспективных систем автономного управления колесными ДСМ на основе обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований.

ГЛАВА 2. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Методика теоретических исследований

При изучении сложных динамических систем целесообразно применять методологию системного анализа, в основе которой лежит понятие системы, состоящей из множества подсистем. Эти подсистемы обладают конкретными свойствами и связаны между собой фиксированными взаимосвязями [49,153,201,232].

В данной работе методология системного анализа применяется при исследовании сложной динамической системы рабочего процесса ДСМ. Эта система рассмотрена как совокупность отдельных подсистем, функционирующих по определенным законам, и связанных между собой в обобщенную математическую модель всей сложной динамической системы рабочего процесса ДСМ.

Достижение цели и решение задач, поставленных в работе, проводилось с использованием основных положений системного анализа [49,153,201,232]:

- структурность системы в виде совокупности связей и их причинности;
- иерархичность системы (сложная динамическая система ДСМ разделена на подсистемы, которые, в свою очередь, тоже делятся на подсистемы, до неделимых элементов);
- целостность системы при ее взаимодействии с внешней средой.

Решение задач с применением методологии системного анализа было проведено в соответствии со следующими этапами [49,153,201,232]:

1) постановка задачи – определены объект и предмет исследования, цели и задачи, а также критерий эффективности для изучения объекта;

2) анализ решаемой задачи – очерчены границы изучаемой системы и определена ее структура; процесс, имеющий отношение к поставленной цели, разбит на изучаемую систему и внешнюю среду; выделены отдельные составляющие части системы, установлены взаимодействия между изучаемой системой и внешней средой; составлены математические модели подсистем и системы в целом;

3) решение поставленных задач – анализ полученных математических моделей подсистем и сложной динамической системы в целом с целью определения количественной оценки связей между структурными составляющими системы; выявлены функциональные зависимости между параметрами системы и показателями эффективности;

4) синтез системы – обоснованы параметры системы, оказывающие наибольшее влияние на показатели эффективности; разработаны научно обоснованные методики оптимизации параметров системы; составлена инженерная методика по выбору оптимальных значений параметров системы;

5) предложены инженерные решения; сформулированы выводы по работе.

Математическое моделирование сложной динамической системы рабочего процесса ДСМ проведено на персональной ЭВМ в среде MatLab R2020b [28,128,224]. Такой способ имеет ряд преимуществ перед натурными испытаниями [201,232]:

- дешевизна;
- вмешательство извне на любой стадии процесса;
- возможность моделирования условий эксперимента, которые невозможно воспроизвести в реальных условиях.

Составление математической модели проведено путем широко распространенного описания подсистем при помощи дифференциальных уравнений, описывающих исследуемые свойства объекта [62,176].

Рабочий процесс ДСМ представляет собой сложную динамическую систему, на которую действуют внешние управляющие и возмущающие воздействия. Параметры подсистем также изменяются во времени, но эти изменения несоизмеримо малы по сравнению с изменениями внешних воздействий, поэтому при моделировании подсистемы представлены с фиксированными параметрами.

Динамические свойства базовой машины и ее подсистем могут быть представлены в различной форме: дифференциальными уравнениями, переходными процессами, амплитудно-фазовыми и амплитудно-частотными характеристиками, передаточными функциями отдельных звеньев и др. [201,232].

В настоящей работе динамические свойства подсистем решено представлять как с помощью аппарата передаточных функций, так и с помощью дифференциальных уравнений.

План эксперимента может быть классический и полный факторный. Классический план заключается в изменении одного фактора во всем интервале значений при постоянстве других независимых факторов. Полный факторный план эксперимента заключается в том, что в нем реализуются все возможные сочетания значений факторов. В данной работе целесообразно использовать полный факторный план эксперимента [201,232].

Математические методы оптимизации можно условно разделить на [147,201,232]:

- аналитические методы;
- численные методы;
- эвристическое программирование;
- стохастическое программирование.

Применение аналитических методов всегда предпочтительней численных, поскольку аналитические методы позволяют получить достаточно полную и общую картину исследуемой функции, установить влияние различных факторов на эту функцию. Аналитические методы применимы, когда критерий, ограничения и связи между координатами, решениями и аргументом, а также начальные и конечные условия представлены функциями, которые должны быть, по крайней мере, два раза дифференцируемыми и иметь конечное число точек разрывов [147,201,232].

Для использования классических методов определения экстремумов функций и функционалов – дифференциального и вариационного исчисления обязательно, кроме того, отсутствие ограничений [147,201,232].

При наличии ограничивающих условий в форме равенств определяется условный экстремум, то есть решается задача Лагранжа. Принцип максимума Л.С. Понтрягина применим в условиях, когда имеются ограничения и решение является функцией аргументов, но модель представляет собой набор

аналитических зависимостей [147,201,232].

Использование численных методов предполагает знание области возможных изменений решения, и чем эта область уже, то есть чем больше ограничений, тем эффективнее применение численных методов оптимизации. В случае, когда критерий представляет собой линейную функцию решения, а ограничения являются набором линейных неравенств и процесс одношаговый (одноэтапный), подобная задача решается методами линейного программирования [147,201,232].

Если критерий и ограничения являются нелинейными функциями решения и процесс одношаговый, то подобная задача решается методами нелинейного программирования. Геометрическое программирование представляет собой математический метод оптимизации, позволяющий решать задачи оптимизации в тех случаях, когда целевая функция и ограничения выражаются нелинейными функциями специального вида. Методы регулярного и случайного поиска применимы для решения любой задачи математической оптимизации, однако весьма трудоемки [147,201,232].

Методы регулярного поиска экстремума функций одной или многих переменных при наличии ограничений предусматривают строго определенный порядок действий. Различают пассивный поиск, при котором не учитываются результаты предыдущих шагов, и последовательный поиск, где эти результаты учитываются [147,201,232].

Методы регулярного поиска хорошо разработаны лишь для отыскания экстремума унимодальных функций одной переменной, то есть функций, имеющих единственный экстремум на интервале допустимых значений аргумента. Универсальных методов отыскания глобальных экстремумов функций многих переменных не существует. В этих случаях применяют метод сканирования (слепого поиска), покоординатного подъема (спуска), называемого также методом Гаусса-Зайделя, градиентный, наискорейшего подъема (спуска) и др. [147,201,232].

Метод случайного поиска используется для отыскания экстремума функций многих переменных при любых ограничениях. Сущность метода состоит в том,

что сначала находят любое допустимое решение, то есть решение, удовлетворяющее всем ограничениям, но не обязательно обеспечивающее экстремум функции. Затем случайным образом меняют какие-либо условия задачи и, найдя новое значение функции, определяют, ближе ли оно к экстремуму, чем первоначально полученное, либо дальше. В зависимости от этого либо возвращаются в исходную точку и оттуда снова начинают движение, либо из полученной точки делают новый случайный шаг [147,201,232].

Метод случайного поиска позволяет получить решение многих задач на ЭВМ быстрее, чем другие методы, однако не всегда гарантирует достижение положительных результатов [147,201,232].

Оптимизация многошаговых (многоэтапных) процессов осуществляется методом динамического программирования. Формально этот метод применим для любых случаев и ограничивается лишь возможностями ЭВМ. Подобными свойствами обладает и дискретный принцип максимума, являющийся распространением принципа максимума Л.С. Понтрягина на дискретные процессы [147,157,201,232].

Эвристическое программирование не является строгим и не гарантирует достижения абсолютного оптимума. При составлении эвристических программ используют опыт специалистов, который формализуется в виде правил, эмпирических зависимостей и схем вычислений. Особенно перспективно эвристическое программирование для решения задач большой размерности и, прежде всего задач инженерного проектирования. Здесь возможно огромное число вариантов. Однако опытный проектировщик, как правило, не анализирует все возможные варианты и сразу отбрасывает большинство из них, сужая область исследования. Этот же прием используется и в эвристическом программировании [147,201,232].

Для подтверждения адекватности полученных математических моделей были проведены экспериментальные исследования. Это позволило составить сравнительную оценку функциональных зависимостей теоретического и экспериментального исследований, количественно оценить их расхождение.

В работе было предложено использовать метод второго порядка – метод Ньютона. Алгоритм оптимизации методом Ньютона представлен на рисунке 2.1.1 и состоит из следующих шагов [201,232]:

1. Постановка задачи оптимизации:

- выбор целевых функций;
- выбор ограничений.



Рисунок 2.1.1 – Алгоритм оптимизационного синтеза методом Ньютона [232]

2. Аппроксимация полученных зависимостей интегрального критерия качества и перерегулирования СУ от анализируемых параметров с целью получения целевых функций:

- обоснование метода аппроксимации;

- определение уравнений регрессии.

3. Решение задачи условной оптимизации:

- обзор методов поиска решения в задачах условной оптимизации;

- алгоритм перехода к задаче безусловной оптимизации.

4. Решение задачи безусловной оптимизации:

- описание выбранного метода поиска решения в задачах безусловной оптимизации;

- получение рациональных значений анализируемых параметров, как результата решения задачи безусловной оптимизации.

5. Нахождение скорректированного оптимального решения по критерию эффективности.

Задача условной оптимизации в общем виде записывается как [201,232]:

$$\left. \begin{aligned} F = f(x_j) &\rightarrow \min; \\ g_i(x_j) &\leq b_i; \\ d_j \leq x_j &\leq D_j; \\ i = 1 \dots m; &j = 1 \dots n. \end{aligned} \right\} \quad (2.1.1)$$

В систему уравнений (2.1.1) входят три составляющие:

- Целевая функция показывает, в каком смысле решение должно быть оптимальным, то есть наилучшим, при этом возможны три вида назначения целевой функции: максимизация, минимизация, назначение заданного значения.

- Ограничения устанавливают зависимости между переменными.

- Граничные условия показывают, в каких пределах могут быть значения.

2.2. Методика экспериментальных исследований

Принятый в настоящей работе комплексный метод исследований предполагает такой этап работы как проведение экспериментальных исследований. Основными задачами экспериментальных исследований являются: экспериментальные определения численных значений параметров, необходимых

для расчета коэффициентов математических моделей; подтверждение адекватности математических моделей; подтверждение работоспособности конструкторских разработок; определение эффективности в производственных условиях предложенных инженерных решений [201,232].

При проведении экспериментальных исследований возможно использование двух методов: активного и пассивного [17,139,201,232].

Пассивный эксперимент предусматривает наблюдение за выходными координатами без вмешательства в процесс функционирования системы. Результаты пассивного эксперимента используются для подтверждения адекватности математических моделей, проверки работоспособности конструкторских разработок, определения эффективности предложенных инженерных решений [17,139,201,232].

Активный эксперимент предусматривает формирование детерминированных воздействий на подсистемы и сложную динамическую систему в целом. Выходные координаты и переходные процессы дают информацию о свойствах объекта [17,139,201,232].

В данной работе целесообразно использовать методологию как активного, так и пассивного эксперимента, в силу того, что внешние возмущающие воздействия имеют стохастическую природу, а при подтверждении адекватности моделей целесообразно формировать детерминированные воздействия [17,201,232].

В качестве оценки достоверности экспериментальных данных использовалась доверительная вероятность – P_x . В данной работе достаточной считалась доверительная вероятность $P_x \approx 0,95$ [17,52,53,106,201,232].

Исключение грубых ошибок измерений проводилось в соответствии с ГОСТ 11.002-73. Для этого по данным упорядоченной выборки $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ вычислялось среднее арифметическое выборки:

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.2.1)$$

и дисперсия:

$$D_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2, \quad (2.2.2)$$

где x_i – значение i -го наблюдения; n – число наблюдений.

Грубой считается ошибка, при которой выполняется неравенство [17,52,53,106,201,232]:

$$\frac{x_i - m_x}{\sigma_x} \geq t_{k,\alpha}, \quad (2.2.3)$$

где $t_{k,\alpha}$ – табличное значение параметра распределения Стьюдента при степени свободы $k = n - 1$ и доверительной вероятности $p_\delta = 1 - \alpha_y$; где α_y – уровень значимости ($\alpha_y = 1 - p_\delta$).

С учетом принятого в работе допущения о нормальном законе распределения результатов наблюдений, истинное значение математического ожидания с вероятностью p_δ лежит в пределах [17,52,53,106,201,232]:

$$m_x - \frac{t_\beta \sigma_x}{\sqrt{n}} \leq m_x \leq m_x + \frac{t_\beta \sigma_x}{\sqrt{n}}, \quad (2.2.4)$$

где t_β – величина, характеризующая для нормального закона распределения число средних квадратических отклонений, откладываемых от центра рассеивания в обе стороны для того, чтобы вероятность попадания в полученный участок была равна p_δ .

Для среднеквадратического отклонения можно записать [17,52,53,106,201,232]:

$$\sigma_x - \frac{t_\beta \sigma_x}{\sqrt{2n}} \leq \sigma_x \leq \sigma_x + \frac{t_\beta \sigma_x}{\sqrt{2n}}. \quad (2.2.5)$$

Количество необходимых измерений определяется исходя из заданной относительной погрешности измерений математического ожидания и среднеквадратического отклонения, по формулам [17,52,53,106,201,232]:

$$n_m = \frac{t_\beta^2 \psi_\delta^2}{\delta_m^2}; \quad (2.2.6)$$

$$n_\sigma = \frac{t_\beta^2}{2\delta_\sigma^2}, \quad (2.2.7)$$

где δ_m и δ_σ – относительные погрешности для математического ожидания и среднеквадратического отклонения соответственно; ψ_δ – коэффициент вариации измеряемой величины.

2.3. Структура выполнения работы

В соответствии с поставленной в работе целью и задачами и с учетом результатов анализа предшествующих исследований были определены основные этапы работы (рис. 2.3.1):

- 1.1. Анализ рабочего процесса ДСМ и составление блок-схем с различными типами СУ, идентификация функций ЧО, классификация ДСМ по функциям ЧО;
- 1.2. Разработка концепции автономного управления колесными ДСМ;
 - 2.1. Анализ существующих СУ ДСМ;
 - 2.2. Классификация существующих СУ ДСМ с введением нового класса перспективных систем автономного управления;
 - 3.1. Анализ критериев эффективности и нормативной документации;
 - 3.2. Обоснование методики оценки эффективности РП колесной ДСМ, оснащенной системой автономного управления;
 - 4.1. Обоснование расчетной схемы ДСМ;
 - 4.2. Декомпозиция системы и разработка математических моделей отдельных подсистем;
 - 4.3. Разработка математической модели рабочего процесса ДСМ;
 - 5.1. Разработка метода построения траектории;
 - 5.2. Разработка методов управления движением ДСМ;
 - 5.3. Разработка математической модели СУ ДСМ;
 - 6.1. Разработка методики теоретических исследований и оптимизационного синтеза;
 - 6.2. Анализ предложенных методов управления движением ДСМ;
 - 6.3. Проведение оптимизационного синтеза СУ движением ДСМ;

7.1. Разработка плана эксперимента и проведение экспериментальных исследований;

7.2. Подтверждение адекватности математической модели рабочего процесса ДСМ;

7.3. Разработка практических рекомендаций и технических решений для создания перспективных систем автономного управления колесными ДСМ.

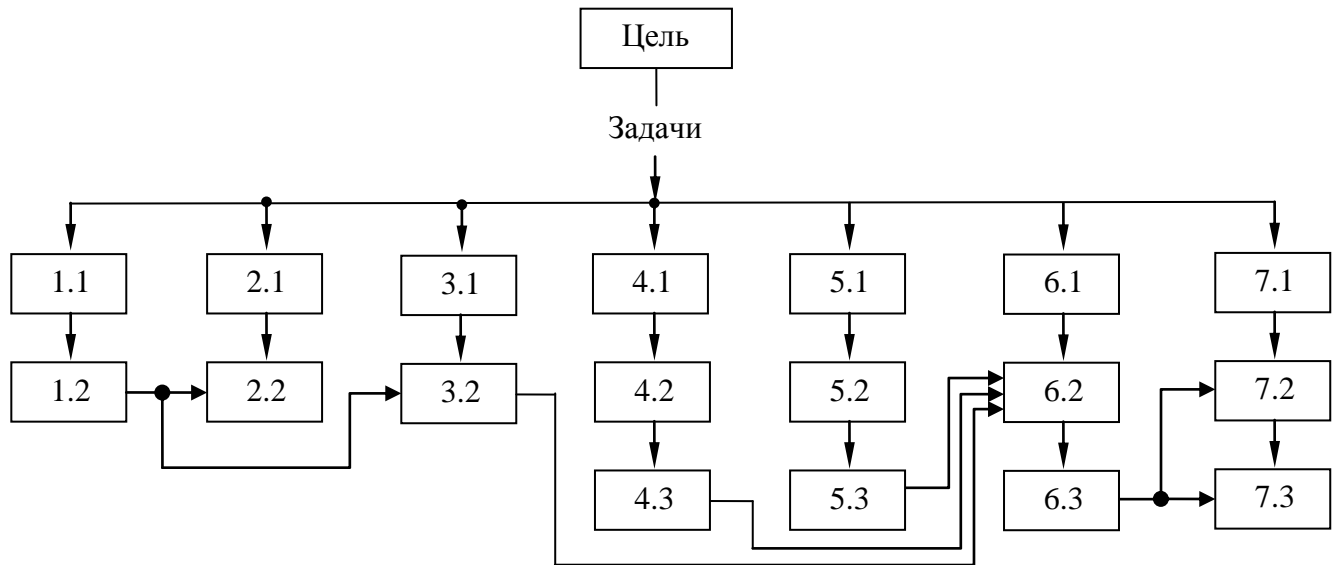


Рисунок 2.3.1 – Структура работы

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

Рабочий процесс ДСМ представляет собой сложную динамическую систему, основными подсистемами которой являются: микрорельеф, базовая машина, РО – обрабатываемая среда, гидропривод РО, ГРУ, ХО, силовая установка и СУ.

На основании методологии системного анализа была проведена декомпозиция сложной динамической системы, составлены математические модели отдельных подсистем и проведена композиция обобщенной математической модели сложной динамической системы рабочего процесса ДСМ.

3.1. Система отсчета перемещений дорожно-строительной машины

Для математического описания рельефа поверхности грунта, проекта земляного сооружения и перемещения ДСМ была принята неподвижная правая ортогональная система координат, жестко привязанная к поверхности Земли $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}Z_{ЗЕМ}$ (рисунок 3.1.1), в которой задана проектная документация земляного сооружения. Начало системы координат $O_{ЗЕМ}$ совпадает с реперной отметкой, ось $O_{ЗЕМ}Z_{ЗЕМ}$ совпадает с гравитационной вертикалью, оси $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}$ и $O_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}$ сориентированы определенным образом по сторонам света.

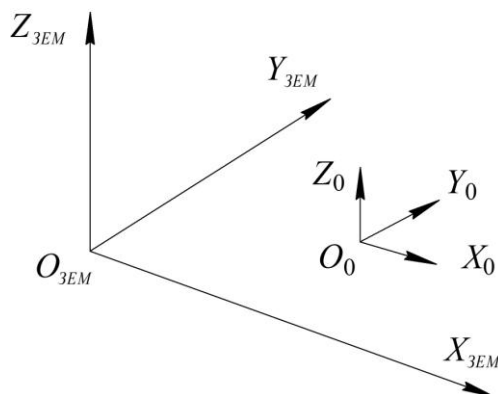


Рисунок 3.1.1 – Система координат Земли

Для описания процесса перемещения ДСМ по поверхности Земли в системе координат $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}Z_{ЗЕМ}$ введена правая ортогональная инерциальная система координат $O_0X_0Y_0Z_0$, расположенная в центре масс ДСМ, оси которой в начальный момент времени совпадают с направлением осей первой локальной системы координат базовой машины $O_1X_1Y_1Z_1$. В качестве примера в работе рассмотрены математические модели двух колесных ДСМ – автогрейдера и фронтального погрузчика, принципиальным отличием которых является расположение РО относительно базы машины.

3.2. Обоснование расчетной схемы автогрейдера

Основной объем земляных работ в дорожном строительстве при разравнивании и планировании грунта выполняют автогрейдеры. Автогрейдер – это самоходная колесная машина для профилирования земляных насыпей, перемещения и разравнивания грунтов и дорожно-строительных материалов [94,167,173,229,230,231].

Для описания математической модели сложной динамической системы рабочего процесса автогрейдера были приняты следующие основные допущения [200,229,230,231]:

1. Автогрейдер представляет собой шарнирно-сочлененный многозвенник с наложенными на него упруго-вязкими связями.
2. Параметры системы считаются сосредоточенными в конечном числе материальных точек.
3. Звенья машины представлены как абсолютно жесткие стержни.
4. Задняя ось представлена балансирными тележками, передняя ось имеет балансирную подвеску.
5. Люфты в шарнирных сочленениях отсутствуют.
6. Силы сухого трения в шарнирах отсутствуют.
7. Передние колеса поворачиваются синхронно.

8. Элементы ходового оборудования не отрываются от опорной поверхности и имеют с ней постоянный точечный контакт.

9. Система стационарна.

10. Упруго-вязкие свойства грунта, гидроцилиндров и элементов ходового оборудования представлены телами Фохта.

11. Внешние силы, действующие на систему, являются сосредоточенными.

12. Угол захвата и вынос отвала зафиксированы.

В качестве инерциальной системы координат $O_0X_0Y_0Z_0$ в данной работе используется правая система декартовых координат. Каждому звену системы присвоена собственная правая локальная система координат $O_iX_iY_iZ_i$. Привязка локальных систем координат к звеньям описана в таблице 3.1.

Обобщенная расчетная схема динамической системы автогрейдера (рисунок 3.2.1) представляет собой систему из семи звеньев ($i = 1 \dots 7$) с сосредоточенными массами, соответствующими моментами инерции и центробежными моментами инерции:

- подмоторная рама массой m_1 включает в себя массы кабины, двигателя, установки гидросистемы, трансмиссию. Центр масс первого звена задается в локальной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$;

- правая балансирная тележка массой m_2 включает в себя массы колес и редуктора. Центр масс второго звена задается в локальной системе координат $O_2X_2Y_2Z_2$;

- левая балансирная тележка массой m_3 включает в себя массы колес и редуктора. Центр масс третьего звена задается в локальной системе координат $O_3X_3Y_3Z_3$.

- хребтовая балка массой m_4 . Центр масс четвертого звена задается в локальной системе координат $O_4X_4Y_4Z_4$;

- тяговая рама массой m_5 включает в себя массы поворотного круга, РО, часть масс гидроцилиндров подъема-опускания и выноса отвала. Центр масс пятого звена задается в локальной системе координат $O_5X_5Y_5Z_5$;

Системы координат

$O_0X_0Y_0Z_0$	Начало инерциальной системы координат O_0 находится в центре масс машины. Направления осей в начальный момент времени совпадают с направлением осей первой системы координат.
$O_1X_1Y_1Z_1$ (связана с подmotorной рамой)	Начало первой локальной системы координат O_1 находится в центре задней оси. Ось O_1X_1 является продольной осью, совпадающей с продольной осью подmotorной рамы. Ось O_1Y_1 параллельна оси заднего моста. Ось O_1Z_1 является вертикальной осью правой прямоугольной системы координат.
$O_2X_2Y_2Z_2$ (связана с правой балансирной тележкой)	Начало второй локальной системы координат O_2 находится в шарнире правой балансирной тележки. Ось O_2Y_2 проходит через шарниры балансирных тележек. Ось O_2X_2 параллельна балансирной тележке. Ось O_2Z_2 образует правую систему прямоугольных координат.
$O_3X_3Y_3Z_3$ (связана с левой балансирной тележкой)	Начало третьей локальной системы координат O_3 находится в шарнире левой балансирной тележки. Ось O_3Y_3 проходит через шарниры балансирных тележек. Ось O_3X_3 параллельна балансирной тележке. Ось O_3Z_3 образует правую систему прямоугольных координат.
$O_4X_4Y_4Z_4$ (связана с хребтовой балкой)	Начало четвертой локальной системы координат O_4 находится на оси шарнира, соединяющего подmotorную раму и хребтовую балку. Ось O_4X_4 является продольной осью, совпадающей с осью хребтовой балки. Ось O_4Z_4 совпадает с осью шарнира складывания рамы автогрейдера. Ось O_4Y_4 образует правую систему прямоугольных координат.
$O_5X_5Y_5Z_5$ (связана с тяговой рамой)	Начало пятой локальной системы координат O_5 находится в центре шарнира тяговой рамы. Ось O_5X_5 совпадает с осью тяговой рамы. Ось O_5Y_5 направлена вправо. Ось O_5Z_5 образует правую систему прямоугольных координат.
$O_6X_6Y_6Z_6$ (связана с передним мостом)	Начало шестой локальной системы координат O_6 находится в центре шарнира балансирной подвески переднего моста. Ось O_6X_6 совпадает с осью шарнира балансирной подвески. Ось O_6Y_6 параллельна оси переднего моста. Ось O_6Z_6 образует правую систему прямоугольных координат.
$O_7X_7Y_7Z_7$ (связана с передними поворотными колесами)	Начало седьмой локальной системы координат O_7 находится на оси переднего правого колеса (принято допущение о синхронном повороте передних колес). Ось O_7X_7 находится в плоскости вращения колеса. Ось O_7Z_7 направлена вертикально вверх. Ось O_7Y_7 образует правую систему прямоугольных координат.

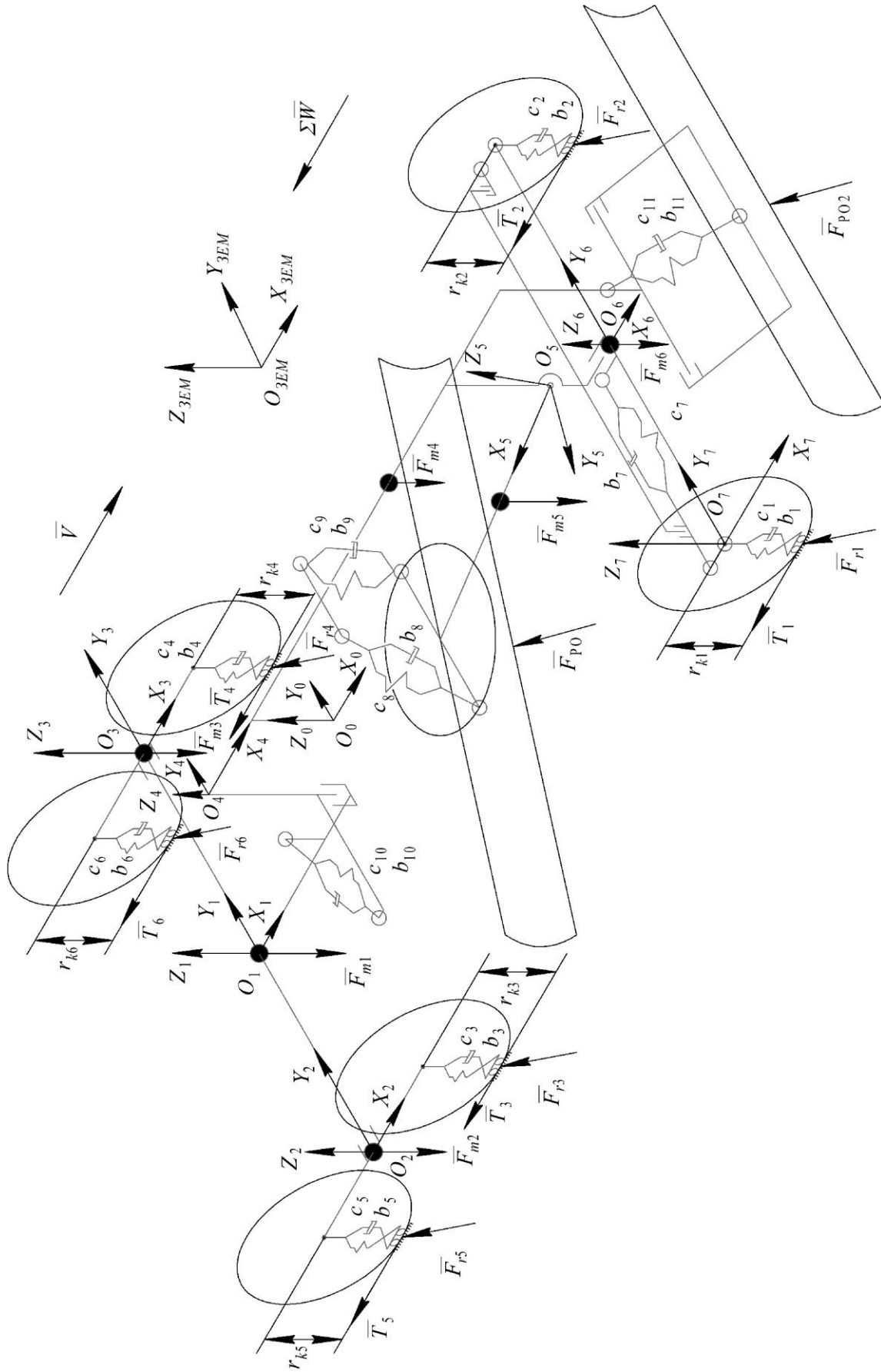


Рисунок 3.2.1 – Пространственная расчетная схема автогрейдера

– передний мост массой m_6 . Центр масс шестого звена задается в локальной системе координат $O_6X_6Y_6Z_6$;

– передние колеса массой m_7 . Центр масс шестого звена задается в локальной системе координат $O_7X_7Y_7Z_7$.

Для описания положения РО, всех элементов расчетной схемы в системе координат Земли было введено 14 обобщенных координат q_j ($j = 1...14$), представленных в таблице 3.2. Малые значения обобщенных координат $q_j \equiv dq_j$.

Таблица 3.2

Степени свободы пространственной колебательной
динамической системы автогрейдера

Степень свободы	Независ. перемен.	Значение
q_1	x_1	перемещение машины (точки O_1) вдоль оси O_0X_0
q_2	y_1	перемещение машины (точки O_1) вдоль оси O_0Y_0
q_3	z_1	перемещение машины (точки O_1) вдоль оси O_0Z_0
q_4	γ_1	поворот подмоторной рамы машины вокруг оси O_1X_1
q_5	ϑ_1	поворот подмоторной рамы машины вокруг оси O_1Y_1
q_6	φ_1	поворот подмоторной рамы машины вокруг оси O_1Z_1
q_7	φ_4	поворот хребтовой балки машины вокруг оси O_4Z_4
q_8	γ_6	поворот переднего моста машины вокруг оси O_6X_6
q_9	φ_K	поворот передних колес вокруг оси O_7Z_7
q_{10}	γ_5	поворот тяговой рамы машины вокруг оси O_5X_5
q_{11}	ϑ_5	поворот тяговой рамы машины вокруг оси O_5Y_5
q_{12}	φ_5	поворот тяговой рамы машины вокруг оси O_5Z_5
q_{13}	ϑ_2	поворот правой балансирной тележки вокруг оси O_2Y_2
q_{14}	ϑ_3	поворот левой балансирной тележки вокруг оси O_3Y_3

Упруговязкие свойства динамических связей, грунта, колес и гидроцилиндров, представленные на схеме (рисунок 3.2.1) в виде тел Фохта, характеризуются коэффициентами c_u и b_u соответственно ($u = 1...10$).

Массы перечисленных звеньев m_i формируют в поле тяготения силы тяжести,

представленные на расчетной схеме векторами \bar{F}_{mi}

$$\bar{F}_{mi} = [0, F_{mi}, 0]^T. \quad (3.2.1)$$

Реакции грунта на элементы ходового оборудования представлены на расчетной схеме силами \bar{F}_r ($r = 1...6$).

$$\bar{F}_r = [F_{rx}, F_{ry}, F_{rz}]^T. \quad (3.2.2)$$

Реакция грунта на РО на расчетной схеме представлена вектором силы

$$\bar{F}_{PO} = [F_{POx}, F_{POy}, F_{POz}]^T. \quad (3.2.3)$$

Положение звеньев расчетной схемы (рис. 3.2.1) определяется положением соответствующих правых локальных систем координат. Координаты центров масс и геометрические размеры звеньев заданы в соответствующих локальных системах координат.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что предложенная расчетная схема отражает наиболее общие признаки динамической системы автогрейдера и может быть использована для вывода уравнений геометрических связей между звеньями расчетной схемы, уравнений статики и динамики автогрейдера.

3.3. Обоснование расчетной схемы фронтального погрузчика

В качестве второй ДСМ в данной работе был выбран фронтальный погрузчик. Фронтальный погрузчик – это самоходная колесная машина для перемещения и разравнивания грунтов и дорожно-строительных материалов [47,54,87,204,229,230].

Для описания математической модели сложной динамической системы рабочего процесса фронтального погрузчика были приняты следующие основные допущения [200,229,230,231]:

1. Фронтальный погрузчик представляет собой шарнирно-сочлененный многозвенник с наложенными на него упруго-вязкими связями.

2. Параметры системы считаются сосредоточенными в конечном числе материальных точек.
3. Звенья машины представлены как абсолютно жесткие стержни.
4. Задняя ось имеет балансирующую подвеску, передняя ось закреплена на передней полураме жестко.
5. Люфты в шарнирных сочленениях отсутствуют.
6. Силы сухого трения в шарнирах отсутствуют.
7. Элементы ходового оборудования не отрываются от опорной поверхности и имеют с ней постоянный точечный контакт.
8. Система стационарна.
9. Упруго-вязкие свойства грунта, гидроцилиндров и элементов ходового оборудования представлены телами Фохта.
10. Внешние силы, действующие на систему, являются сосредоточенными.

В качестве инерциальной системы координат $O_0X_0Y_0Z_0$ в данной работе используется правая система декартовых координат. Каждому звену системы присвоена собственная правая локальная система координат $O_iX_iY_iZ_i$. Привязка локальных систем координат к звеньям описана в таблице 3.3.

Обобщенная расчетная схема динамической системы фронтального погрузчика (рисунок 3.3.1) представляет собой систему из четырех звеньев ($i = 1...4$) с сосредоточенными массами, соответствующими моментами инерции и центробежными моментами инерции:

- задняя полурама массой m_1 включает в себя массы кабины, двигателя, установки гидросистемы, трансмиссию. Центр масс первого звена задается в локальной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$;
- задний мост массой m_2 включает в себя массы колес и редуктора. Центр масс второго звена задается в локальной системе координат $O_2X_2Y_2Z_2$;
- передняя полурама массой m_3 включает в себя массы колес, редуктора, РО и его механизма подъема-опускания с гидроприводом. Центр масс третьего звена задается в локальной системе координат $O_3X_3Y_3Z_3$;

– РО массой m_4 включает в себя массу стрелы, ковша и гидропривода подъема-опускания стрелы и поворота ковша. Центр масс четвертого звена задается в локальной системе координат $O_4X_4Y_4Z_4$.

Для описания положения РО, всех элементов расчетной схемы в системе координат Земли было введено 9 обобщенных координат q_j ($j = 1 \dots 9$), представленных в таблице 3.4. Малые значения обобщенных координат $q_j \equiv dq_j$.

Таблица 3.3

Системы координат

$O_0X_0Y_0Z_0$	Начало инерциальной системы координат O_0 находится в центре масс машины. Направления осей в начальный момент времени совпадают с направлением осей первой системы координат.
$O_1X_1Y_1Z_1$ (связана с задней полурамой)	Начало первой локальной системы координат O_1 находится в центре задней полурамы. Ось O_1X_1 является продольной осью, совпадающей с продольной осью задней полурамы. Ось O_1Y_1 параллельна оси заднего моста. Ось O_1Z_1 является вертикальной осью правой прямоугольной системы координат.
$O_2X_2Y_2Z_2$ (связана с задним мостом)	Начало второй локальной системы координат O_2 находится в центре заднего моста. Ось O_2X_2 параллельна продольной оси передней полурамы. Ось O_2Y_2 совпадает с осью заднего моста. Ось O_2Z_2 образует правую систему прямоугольных координат.
$O_3X_3Y_3Z_3$ (связана с передней полурамой)	Начало третьей локальной системы координат O_3 находится в шарнире складывания полурам. Ось O_3X_3 параллельна продольной оси передней полурамы. Ось O_3Z_3 параллельна оси O_1Z_1 . Ось O_3Y_3 образует правую систему прямоугольных координат.
$O_4X_4Y_4Z_4$ (связана с РО)	Начало четвертой локальной системы координат O_4 находится в шарнире подъема-опускания РО. Ось O_4X_4 проходит через центр кромки РО. Ось O_4Y_4 параллельна оси O_3Y_3 . Ось O_4Z_4 образует правую систему прямоугольных координат.

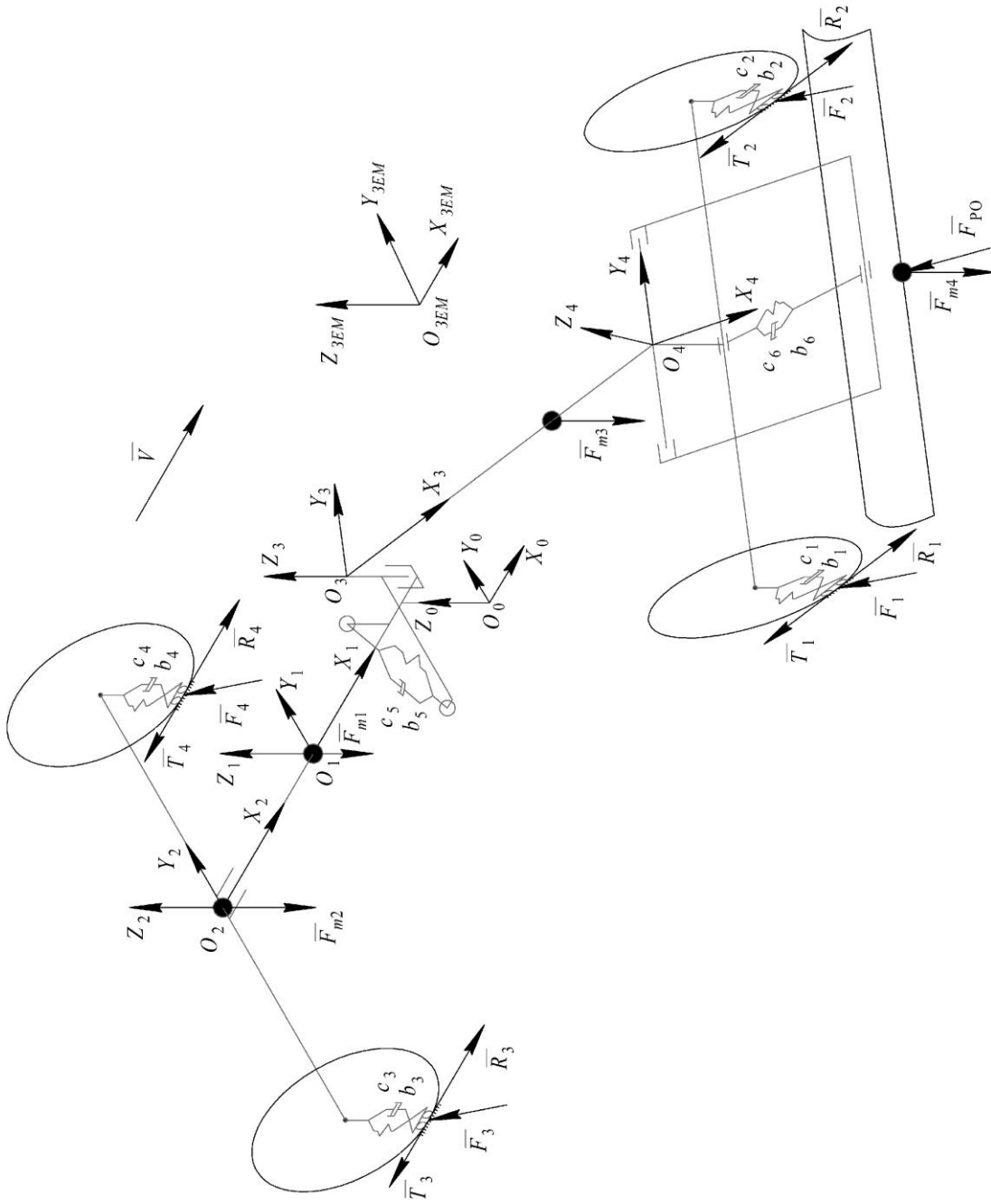


Рисунок 3.3.1.1 – Пространственная расчетная схема фронтального погрузчика

Степени свободы пространственной колебательной динамической системы фронтального погрузчика

Степень свободы	Независ. перемен.	Значение
q_1	x_1	перемещение машины (точки O_1) вдоль оси O_0X_0
q_2	y_1	перемещение машины (точки O_1) вдоль оси O_0Y_0
q_3	z_1	перемещение машины (точки O_1) вдоль оси O_0Z_0
q_4	γ_1	поворот задней полурамы машины вокруг оси O_1X_1
q_5	ϑ_1	поворот задней полурамы машины вокруг оси O_1Y_1
q_6	φ_1	поворот задней полурамы машины вокруг оси O_1Z_1
q_7	γ_2	поворот заднего моста машины вокруг оси O_2X_2
q_8	φ_3	складывание полурам машины вокруг оси O_3Z_3
q_9	ϑ_4	поворот стрелы с ковшом вокруг оси O_4Y_4

Упруговязкие свойства динамических связей, грунта, колес и гидроцилиндров, представленные на схеме (рисунок 3.3.1) в виде тел Фохта, характеризуются коэффициентами c_u и b_u соответственно ($u = 1 \dots 6$).

Массы перечисленных звеньев m_i формируют в поле тяготения силы тяжести, представленные на расчетной схеме векторами \bar{F}_{mi}

$$\bar{F}_{mi} = [0, F_{mi}, 0]^T. \quad (3.3.1)$$

Реакции грунта на элементы ходового оборудования представлены на расчетной схеме силами \bar{F}_r ($r = 1 \dots 4$).

$$\bar{F}_r = [F_{rx}, F_{ry}, F_{rz}]^T. \quad (3.3.2)$$

Реакция грунта на РО на расчетной схеме представлена вектором

$$\bar{F}_{PO} = [F_{POx}, F_{POy}, F_{POz}]^T. \quad (3.3.3)$$

Положение звеньев расчетной схемы (рис. 3.3.1) определяется положением соответствующих правых локальных систем координат.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что предложенная расчетная схема отражает наиболее общие признаки динамической системы

фронтального погрузчика и может быть использована для вывода уравнений геометрических связей между звеньями расчетной схемы, уравнений статики и динамики фронтального погрузчика.

3.4. Уравнения геометрических связей динамической системы колесной дорожно-строительной машины

В однородных координатах векторам, представляющим точки трехмерного пространства и имеющим вид [131,158,229,230,231]

$$\bar{R}_i = [x_i, y_i, z_i, 1]^T, \quad (3.4.1)$$

соответствуют точки трехмерного евклидова или, точнее, аффинного пространства с декартовыми координатами [131,158,229,230,231]

$$\bar{R}_{\partial i} = [x_{\partial i}, y_{\partial i}, z_{\partial i}]^T \quad (3.4.2)$$

где $x_{\partial i} = \frac{x_i}{1}$; $y_{\partial i} = \frac{y_i}{1}$; $z_{\partial i} = \frac{z_i}{1}$.

Используя метод однородных координат, любую точку, заданную в системе координат $O_i X_i Y_i Z_i$ вектором \bar{R}_i , можно представить в системе координат $O_{i-1} X_{i-1} Y_{i-1} Z_{i-1}$ вектором \bar{R}_{i-1} . Уравнение перехода в этом случае запишется в следующем виде [131,158,229,230,231]:

$$\bar{R}_{i-1} = A_i \cdot \bar{R}_i; \quad (3.4.3)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \tau_{\partial i} & L_{\partial i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.4.4)$$

где A_i – блочная матрица размером 4x4; $\tau_{\partial i}$ – матрица поворота осей в декартовой системе координат размером 3x3; $L_{\partial i}$ – матрица параллельного переноса осей размером 3x1; 0 – нулевая матрица размером 1x3; 1 – единичная матрица.

$$L_{\partial i} = [l_{x_i}, l_{y_i}, l_{z_i}]^T, \quad (3.4.5)$$

$$\tau_{\partial i} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i \cdot \cos \mathcal{G}_i & \sin \mathcal{G}_i & -\sin \varphi_i \cdot \cos \mathcal{G}_i \\ \sin \varphi_i \cdot \sin \gamma_i - & \cos \mathcal{G}_i \cdot \cos \gamma_i & \cos \varphi_i \cdot \sin \gamma_i + \\ -\cos \varphi_i \cdot \cos \gamma_i \sin \mathcal{G}_i & & +\sin \varphi_i \cdot \cos \gamma_i \sin \mathcal{G}_i \\ \sin \varphi_i \cdot \cos \gamma_i + & -\cos \mathcal{G}_i \cdot \sin \gamma_i & \cos \varphi_i \cdot \cos \gamma_i - \\ +\cos \varphi_i \cdot \sin \gamma_i \sin \mathcal{G}_i & & -\sin \varphi_i \cdot \sin \gamma_i \sin \mathcal{G}_i \end{bmatrix}. \quad (3.4.6)$$

Матрица $\tau_{\partial i}$ получена с учетом некоммутативности углов Эйлера и соблюдения в связи с этим правил последовательности поворота осей системы координат $O_i X_i Y_i Z_i$ на углы φ_i , \mathcal{G}_i , γ_i , за положительное направление углов принят поворот против часовой стрелки.

Блочную матрицу A_i можно рассматривать как произведение матриц параллельного переноса и поворота осей координат [131,158,229,230,231]:

$$A_i = A_{i_1} \cdot A_{i_2} \cdot A_{i_3} \cdot A_{i_4} \cdot A_{i_5} \cdot A_{i_6}, \quad (3.4.7)$$

$$\text{где } A_{i_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \mathbf{l}_{Xi} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.4.8)$$

$$A_{i_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \mathbf{l}_{Yi} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.4.9)$$

$$A_{i_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \mathbf{l}_{Zi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.4.10)$$

$$A_{i_4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_i & \sin \gamma_i & 0 \\ 0 & -\sin \gamma_i & \cos \gamma_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.4.11)$$

$$A_{i5} = \begin{bmatrix} \cos \mathcal{G}_i & \sin \mathcal{G}_i & 0 & 0 \\ -\sin \mathcal{G}_i & \cos \mathcal{G}_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.4.12)$$

$$A_{i6} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & 0 & -\sin \varphi_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \varphi_i & 0 & \cos \varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.4.13)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i \cdot \cos \mathcal{G}_i & \sin \mathcal{G}_i & -\sin \varphi_i \cdot \cos \mathcal{G}_i & l_{xi} \\ \sin \varphi_i \cdot \sin \gamma_i - & \cos \mathcal{G}_i \cdot \cos \gamma_i & \cos \varphi_i \cdot \sin \gamma_i + & l_{yi} \\ -\cos \varphi_i \cdot \cos \gamma_i \sin \mathcal{G}_i & & +\sin \varphi_i \cdot \cos \gamma_i \sin \mathcal{G}_i & \\ \sin \varphi_i \cdot \cos \gamma_i + & -\cos \mathcal{G}_i \cdot \sin \gamma_i & \cos \varphi_i \cdot \cos \gamma_i - & l_{zi} \\ +\cos \varphi_i \cdot \sin \gamma_i \sin \mathcal{G}_i & & -\sin \varphi_i \cdot \sin \gamma_i \sin \mathcal{G}_i & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.4.14)$$

Для представления i -й точки в инерциальной системе координат необходимо выполнить преобразование [131,158,229,230,231]

$$\bar{R}_0 = T_i \cdot \bar{R}_i, \quad (3.4.15)$$

где

$$T_i = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_i. \quad (3.4.16)$$

Матрица перехода T_i сформирована по большим значениям обобщенных координат, определяющим взаимное положение звеньев. Уравнение (3.4.15) является нелинейным. Линеаризация нелинейных уравнений осуществлена методом Тейлора, что позволило с достаточной для практических целей точностью рассмотреть малые перемещения характерных точек расчетной схемы [126,153,218,228,229]:

$$df = \sum_{j=1}^l \frac{\partial f}{\partial q_j} \cdot q_j, \quad (3.4.17)$$

где $q_j \equiv dq_j$ – малое значение обобщенной координаты; q_j – большое значение обобщенной координаты.

В линеаризованном виде векторы координат характерных точек в инерциальной системе координат и векторы их скоростей будут иметь вид [131,158,229,230,231]:

$$\bar{R}_{oi} = \sum_{j=1}^l U_{ij} \cdot q_j \cdot \bar{R}_i; \quad (3.4.18)$$

$$\dot{\bar{R}}_{oi} = \frac{d\bar{R}_{oi}}{dt}; \quad (3.4.19)$$

$$\dot{\bar{R}}_{oi} = \sum_{j=1}^l U_{ij} \cdot \frac{dq_j}{dt} \cdot \bar{R}_i = V_i \cdot \bar{R}_i; \quad (3.4.20)$$

$$V_i = \sum_{j=1}^l U_{ij} \cdot \frac{dq_j}{dt}; \quad (3.4.21)$$

$$U_{ij} = \frac{\partial T_i}{\partial q_j}. \quad (3.4.22)$$

Операции дифференцирования по (3.4.22) на ЭВМ проведена с помощью дифференцирующих матриц [131,158,229,230,231]:

$$E_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (3.4.23) \quad E_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (3.4.24)$$

$$E_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (3.4.25) \quad E_g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (3.4.26)$$

$$E_\varphi = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (3.4.27) \quad E_\gamma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (3.4.28)$$

$$E_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.4.29)$$

В динамических расчетных схемах автогрейдера и фронтального погрузчика упруговязкие свойства гидроцилиндров и элементов ходового оборудования представлены моделью Фохта. Для математического описания упруговязких эле-

ментов в однородных координатах (на примере гидроцилиндра) они были представлены в виде векторов (рисунок 3.4.1) [131,158,229,230,231].

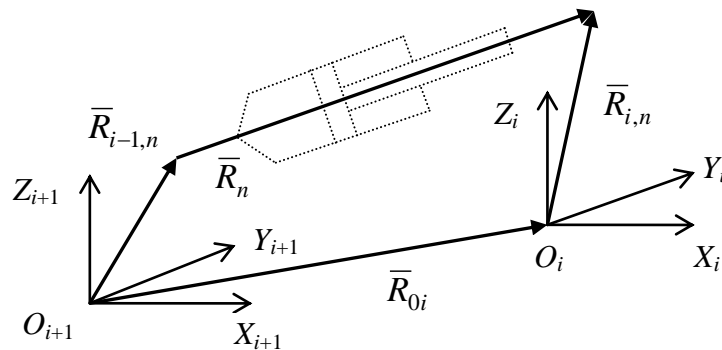


Рисунок 3.4.1 – Представление упруговязкого элемента в виде вектора

Векторы $\bar{R}_{i,n}$ и $\bar{R}_{i-1,n}$ определяют координаты характерных точек упруговязкого элемента, например, гидроцилиндра рабочего оборудования ДСМ. Шарнир крепления штока гидроцилиндра принадлежит системе координат звена i , а шарнир крепления гильзы гидроцилиндра принадлежит системе координат звена $i-1$. Вектор подвижного конца гидроцилиндра (штока) $\bar{R}_{i,n}$ переводится в систему координат неподвижного конца $A_i \cdot \bar{R}_{i,n}$, в этом случае вектор \bar{R}_n , соединяющий концы упруговязкого элемента, будет определяться [131,158,229,230,231]

$$\bar{R}_n = A_i \cdot \bar{R}_{i,n} - \bar{R}_{i-1,n}, \quad (3.4.30)$$

где A_i - матрица перехода из i -ой системы координат подвижной точки тела Фохта в $i-1$ систему координат неподвижной точки.

Матрицы перехода из системы координат подвижного конца упруговязкого элемента в систему координат неподвижного конца обозначены Γ_i . Для элементов ходового оборудования ДСМ, каждый из которых может быть представлен телом Фохта, направленным вдоль координатной оси инерциальной системы координат, матрицы Γ_i будут иметь вид [126,153,218,228,229]:

$$\Gamma_X = D_X A_i; \quad (3.4.31)$$

$$\Gamma_Y = D_Y A_i; \quad (3.4.32)$$

$$\Gamma_Z = D_Z A_i, \quad (3.4.33)$$

где D_X , D_Y , D_Z – матрицы, определяющие направление смещения упруговязких элементов ходового оборудования вдоль координатных осей X_0 , Y_0 , Z_0 [131,158,229,230,231]

$$D_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad D_Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad D_Z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.4.34)$$

Для гидроцилиндров рабочего оборудования ДСМ матрицы Γ_i будут иметь вид [131,158,229,230,231]

$$\Gamma_{(i-n),i} = \prod_{i-n}^i A_i \quad (3.4.35)$$

Линеаризованные векторы малых отклонений и скоростей характерных точек подвижных концов упруговязких элементов имеют вид [131,158,229,230,231]

$$\bar{R}_i = \sum_{j=1}^{14} M_{uj} \cdot q_j \cdot \bar{R}_{i,n}; \quad (3.4.36)$$

$$M_{uj} = \frac{\partial \Gamma_u}{\partial q_j}; \quad (3.4.37)$$

$$\dot{\bar{R}}_i = \frac{d\bar{R}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{14} M_{uj} \cdot \frac{dq_j}{dt} \cdot \bar{R}_{i,n} = W_u \cdot \bar{R}_{i,n}; \quad (3.4.38)$$

$$W_u = \sum_{j=1}^{14} M_{uj} \cdot \frac{dq_j}{dt}. \quad (3.4.39)$$

3.5. Математическое описание динамической системы методом дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода

По расчетным схемам автогрейдера и фронтального погрузчика были составлены математические модели. Для этого был использован метод дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода (далее в параграфе приведены уравнения, описывающие математическую модель автогрейдера, математическая модель фронтального погрузчика была составлена аналогично) [131,158,229,230,231]:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right] - \frac{\partial K}{\partial q_j} + \frac{\partial P}{\partial q_j} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j} = \bar{F}_j, \quad (3.5.1)$$

где t – время; q_j – обобщенная координата; K – кинетическая энергия; P – потенциальная энергия; Φ – диссипативная функция; \dot{q}_j – обобщенная скорость; \bar{F}_j – обобщенная сила, действующая по j -ой обобщенной координате.

В векторно-матричной форме линеаризованная система дифференциальных уравнений будет иметь вид [131,158,229,230,231]:

$$A \cdot \ddot{\bar{q}} - B \cdot \dot{\bar{q}} + C \cdot \bar{q} = \bar{F}. \quad (3.5.2)$$

где A , B , C – матрицы коэффициентов дифференциальных уравнений (A – матрица инерционных коэффициентов, B – матрица коэффициентов демпфирования, C – матрица коэффициентов жесткости); $\ddot{\bar{q}}$, $\dot{\bar{q}}$, \bar{q} – векторы соответственно ускорения, скорости и обобщенных координат; \bar{F} – вектор внешних сил, действующих по обобщенным координатам.

Кинетическая энергия механической системы K определена как сумма кинетических энергий каждого звена, обладающего инерционными свойствами [131,158,229,230,231]

$$K = \sum_{i=1}^7 K_i. \quad (3.5.3)$$

Каждое звено рассмотрено как сочетание бесконечно малых точек с элементарными массами dm , с координатами \bar{R}_i , заданными в локальной системе координат i -го звена и соответствующими элементарными кинетическими энергиями dK_i , которые находятся по формуле [131,158,229,230,231]

$$dK_i = \frac{1}{2} |\dot{\bar{R}}_{0i}|^2 dm. \quad (3.5.4)$$

Квадрат модуля вектора изменения положения i -й точки в инерциальной системе координат определится как «трасса», то есть сумма диагональных элементов, матрицы размера 4×4 [131,158,229,230,231]

$$|\bar{R}_{0i}|^2 = \text{tr}[\bar{R}_{0i} \cdot \bar{R}_{0i}^T]; \quad (3.5.5)$$

$$\bar{R}_{0i} = [\mathbf{x}_{oi} \quad \mathbf{y}_{oi} \quad \mathbf{z}_{oi} \quad 1]^T; \quad (3.5.6)$$

$$\bar{R}_{0i}^T = [\mathbf{x}_{oi} \quad \mathbf{y}_{oi} \quad \mathbf{z}_{oi} \quad 1]. \quad (3.5.7)$$

Учитывая, что в линеаризованном виде $\bar{R}_{oi} = \sum_{j=1}^{14} U_{ij} \cdot \dot{q}_j \cdot \bar{R}_i$, с учетом правил перемножения сцепленных матриц уравнение (3.5.4) примет вид [131,158,229,230,231]

$$dK_i = \frac{1}{2} \cdot tr \left[\sum_{j=1}^{14} (U_{ij} \cdot \dot{q}_j) \cdot \bar{R}_i \cdot \bar{R}_i^T \cdot \sum_{j=1}^{14} (U_{ij}^T \cdot \dot{q}_j) \right] \cdot dm. \quad (3.5.8)$$

Полная кинетическая энергия звена получена интегрированием элементарных энергий всех элементарных точек звена [131,158,229,230,231]

$$K_i = \frac{1}{2} \cdot tr \left[\sum_{j=1}^{14} (U_{ij} \cdot \dot{q}_j) \cdot \left[\int_m \bar{R}_i \cdot \bar{R}_i^T \cdot dm \right] \cdot \sum_{j=1}^{14} (U_{ij}^T \cdot \dot{q}_j) \right]. \quad (3.5.9)$$

Введем обозначение матрицы инерционности H_i [131,158,229,230,231]

$$H_i = \int_{(m)} \bar{R}_i \bar{R}_i^T dm; \quad (3.5.10)$$

$$H_i = \begin{bmatrix} \int_{(m)} x_i^2 dm & \int_{(m)} x_i y_i dm & \int_{(m)} x_i z_i dm & \int_{(m)} x_i dm \\ \int_{(m)} x_i y_i dm & \int_{(m)} y_i^2 dm & \int_{(m)} y_i z_i dm & \int_{(m)} y_i dm \\ \int_{(m)} x_i z_i dm & \int_{(m)} y_i z_i dm & \int_{(m)} z_i^2 dm & \int_{(m)} z_i dm \\ \int_{(m)} x_i dm & \int_{(m)} y_i dm & \int_{(m)} z_i dm & m_i \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(-J_{ix} + J_{iy} + J_{iz}) & J_{ixy} & J_{ixz} & x_i m_i \\ J_{ixy} & \frac{1}{2}(J_{ix} - J_{iy} + J_{iz}) & J_{iyz} & y_i m_i \\ J_{ixz} & J_{iyz} & \frac{1}{2}(J_{ix} + J_{iy} - J_{iz}) & z_i m_i \\ x_i m_i & y_i m_i & z_i m_i & m_i \end{bmatrix} =$$

$$= m_i \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(-\rho_{ix}^2 + \rho_{iy}^2 + \rho_{iz}^2) & \rho_{ixy}^2 & \rho_{ixz}^2 & x_i \\ \rho_{ixy}^2 & \frac{1}{2}(\rho_{ix}^2 - \rho_{iy}^2 + \rho_{iz}^2) & \rho_{iyz}^2 & y_i \\ \rho_{ixz}^2 & \rho_{iyz}^2 & \frac{1}{2}(\rho_{ix}^2 + \rho_{iy}^2 - \rho_{iz}^2) & z_i \\ x_i & y_i & z_i & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.5.11)$$

где J_{ix}, J_{iy}, J_{iz} – моменты инерции; $J_{ixy}, J_{ixz}, J_{iyz}$ – центробежные моменты инерции; $\rho_{ix}, \rho_{iy}, \rho_{iz}$ – радиусы инерции звена; $\rho_{ixy}, \rho_{ixz}, \rho_{iyz}$ – центробежные радиусы инер-

ции; x_i, y_i, z_i – координаты центров масс i -го звена в локальной системе координат; m_i – масса i -го звена.

Для совокупности звеньев динамической системы полная кинетическая энергия системы будет иметь вид [131,158,229,230,231]

$$K = \sum_{i=1}^7 \frac{1}{2} \cdot \text{tr} \left[\sum_{j=1}^{14} U_{ij} \cdot H_i \cdot U_{ij}^T \cdot \dot{q}_j^2 \right]. \quad (3.5.12)$$

Для подстановки в дифференциальное уравнение Лагранжа второго рода продифференцируем выражение (3.5.12):

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right] = \sum_{j=1}^{14} \sum_{i=1}^7 \text{tr} [U_{ij} H_i U_{ij}^T] \ddot{q}_j. \quad (3.5.13)$$

Потенциальная энергия системы определяется как сумма потенциальных энергий отдельных звеньев в поле тяготения P_g и потенциальных энергий упругих элементов P_z [131,158,229,230,231]:

$$P = P_z + P_g. \quad (3.5.14)$$

Потенциальная энергия звеньев в поле тяготения P_g определялась как сумма потенциальных энергий в поле тяготения всех звеньев, имеющих массу m_i , [131,158,229,230,231]:

$$P_g = \sum_{i=1}^7 m_i g \bar{G}^T T_i \bar{R}_i, \quad (3.5.15)$$

где g – ускорение свободного падения, \bar{G} – вектор направления сил тяжести звеньев в инерциальной системе координат $\bar{G}^T = [X_G \ Y_G \ Z_G \ 1]$ (направление данного вектора определяется углами наклона опорной поверхности в продольном и боковом направлениях относительно горизонтальной плоскости).

Для ДСМ, находящейся на горизонтальной опорной поверхности, $\bar{G}^T = [0 \ 0 \ 1 \ 1]$.

Определение потенциальной энергии упругих элементов осуществляется на основе уравнения Клайперона [131,158,229,230,231]:

$$P_y = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^{10} C_u \lambda_u^2, \quad (3.5.16)$$

где C_u – коэффициент упругости u -го упругого элемента; λ_u – деформация u -го упругого элемента.

Деформация упруговязких элементов – тел Фохта для случая малых перемещений определится как модуль вектора малого перемещения характерных точек подвижных концов упруговязких элементов в инерционной системе координат [131,158,229,230,231]:

$$P_y = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^{10} C_u |\bar{R}_u|^2. \quad (3.5.17)$$

С учетом вышеизложенного:

$$P_y = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^{10} \text{tr}[Q_u N_u Q_u^T]; \quad (3.5.18)$$

$$Q_u = \sum_{u=1}^{10} M_{uj} \cdot q_j; \quad (3.5.19)$$

$$N_u = C_u \cdot [\bar{R}_{eu} \cdot \bar{R}_{eu}^T], \quad (3.5.20)$$

где \bar{R}_{eu} – вектор подвижного конца упруговязкого элемента в локальной системе координат подвижного конца; N_u – матрица упругости размером 4x4.

Выражение полной потенциальной энергии звеньев динамической системы имеет вид [131,158,229,230,231]

$$P = \sum_{i=1}^7 m_i g G^T T_i \bar{R}_i + \frac{1}{2} \sum_{u=1}^{10} \text{tr}[Q_u N_u Q_u^T]. \quad (3.5.21)$$

Продифференцировав выражение потенциальной энергии для подстановки в уравнение Лагранжа, получим [131,158,229,230,231]

$$\frac{\partial P}{\partial q_j} = \sum_{i=1}^7 m_i g G^T U_{ij} \bar{R}_i + \sum_{j=1}^{14} \sum_{u=1}^{10} \text{tr}[M_{uj} N_u M_{uj}^T] q_j. \quad (3.5.22)$$

Диссипативная составляющая в уравнении Лагранжа для системы звеньев представлена функцией Релея [131,158,229,230,231]

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^{10} b_u \dot{\lambda}_u^2; \quad (3.5.23)$$

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^{10} b_u \left| \dot{\bar{R}}_u \right|^2, \quad (3.5.24)$$

где b_u – приведенный коэффициент вязкого трения u -го элемента; $\dot{\lambda}_u$ – скорость деформации u -го элемента.

Продифференцировав выражение диссипативной функции, получим [131,158,229,230,231]

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j} = \sum_{u=1}^{10} \sum_{j=1}^{14} \text{tr}[M_{uj} B_u M_{uj}^T] \dot{q}_j, \quad (3.5.25)$$

где
$$B_u = b_u \cdot [\bar{R}_{eu} \cdot \bar{R}_{eu}^T]. \quad (3.5.26)$$

Обобщенные внешние силы, стоящие в правой части системы уравнений Лагранжа, определяются по формуле [131,158,229,230,231]:

$$\bar{F}_j = \sum_{r=1}^7 \bar{F}_r \frac{d\bar{R}_{0r}}{dq_j}; \quad (3.5.27)$$

$$\bar{F}_j = \sum_{r=1}^7 \bar{F}_r \cdot U_{ij} \cdot \bar{R}_{ir}, \quad (3.5.28)$$

где \bar{F}_r – сила, приложенная к звену расчетной схемы; \bar{R}_{0r} – вектор координат точки приложения сил в инерциальной системе координат; \bar{R}_{ir} – вектор координат точки приложения силы к звену i в локальной системе координат этого звена.

Вектор \bar{F}_r имеет вид [131,158,229,230,231]:

$$\bar{F}_r = [F_{rx}, F_{ry}, F_{rz}, 1]. \quad (3.5.29)$$

После подстановки всех слагаемых в уравнение Лагранжа, получим уравнение движения ДСМ в виде системы дифференциальных уравнений [131,158,229,230,231]:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{14} \text{tr}[U_{ij} H_i U_{iv}^T] \ddot{q}_j + \sum_{u=1}^{10} \sum_{j=1}^{14} \text{tr}[M_{uj} B_u M_{uv}^T] \dot{q}_j + \\ & + \sum_{u=1}^{10} \sum_{j=1}^{14} \text{tr}[M_{uj} N_u M_{uv}^T] q_j + \sum_{i=1}^7 m_i g G^T U_{iv} \bar{R}_i = \sum_{r=1}^7 \bar{F}_r U_{iv} \bar{R}_{ir}. \end{aligned} \quad (3.5.30)$$

Систему дифференциальных уравнений можно представить в векторно-матричной форме [131,158,229,230,231]:

$$A\ddot{\vec{q}} + B\dot{\vec{q}} + C\vec{q} = \vec{F}, \quad (3.5.31)$$

где A, B, C – матрицы коэффициентов дифференциальных уравнений размером 14×14 ; $\vec{\ddot{q}}, \vec{\dot{q}}, \vec{q}$ – матрицы размером 14×1 , представляющие значения соответственно ускорений, скоростей и малых отклонений обобщенных координат; \vec{F} – матрица сил размером 14×1 .

Элементы матриц A, B, C определяются по формулам [131,158,229,230,231]:

$$a_{jv} = \sum_{i=1}^7 \text{tr}[U_{ij} H_i U_{iv}^{\square}]; \quad (3.5.32)$$

$$b_{jv} = \sum_{u=1}^{10} \text{tr}[M_{uj} B_u M_{uv}^{\square}]; \quad (3.5.33)$$

$$c_{jv} = \sum_{u=1}^{10} \text{tr}[M_{uj} N_u M_{uv}^{\square}]. \quad (3.5.34)$$

Коэффициенты дифференциальных уравнений являются функциями больших значений обобщенных координат и конструктивных параметров ДСМ [131,158,229,230,231].

Результатом решения системы дифференциальных уравнений, как с замороженными, так и с переменными коэффициентами, являются временные зависимости изменения обобщенных координат, отражающие изменение положения элементов ДСМ в пространстве [131,158,229,230,231].

Математические модели автогрейдера и фронтального погрузчика, составленные на основе предложенной методики, позволили решить задачи статики, кинематики и динамики [131,158,229,230,231].

3.6. Математическая модель микрорельефа

В данной работе математическая модель трехмерного микрорельефа основана на холмовом алгоритме [170,193]:

1. Создается двумерный массив и инициализируется нулевым уровнем;
2. Выбирается случайная точка в массиве или за его границами, а также случайный радиус в заранее заданных пределах;
3. В выбранной точке «поднимается» холм заданного радиуса;

4. Возврат ко второму шагу и так далее до выбранного количества шагов. От этого будет зависеть внешний вид микрорельефа;

5. Проводится нормализация микрорельефа;

Холм – это половина сферы, чем больше радиус – тем выше холм. Математически холм можно представить с помощью уравнения сферы [170,193]:

$$z = R^2 - ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2), \quad (3.6.1)$$

где x_1, y_1 – координаты центра холма, R – выбранный радиус, x_2, y_2 – координаты текущей точки, z – значение высоты в текущей точке.

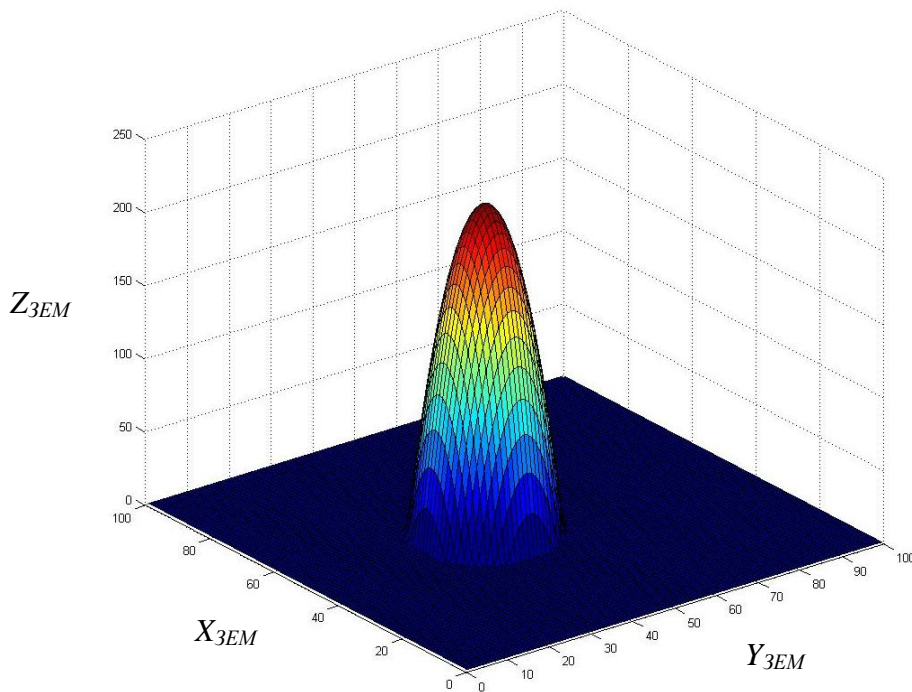


Рисунок 3.6.1 – Внешний вид поверхности после генерации одного холма [193]

При этом радиус должен подбираться с учетом принятой корреляционной функции. Реализация данного условия возможна при помощи цифрового фильтра, передаточная функция которого описана уравнением (1.4.11).

Чтобы сгенерировать микрорельеф полностью необходимо построить множество таких холмов. При этом необходимо игнорировать отрицательные значения высоты холма и при генерации последующих холмов добавлять полученное значение для данного холма к уже существующим значениям [170,193].

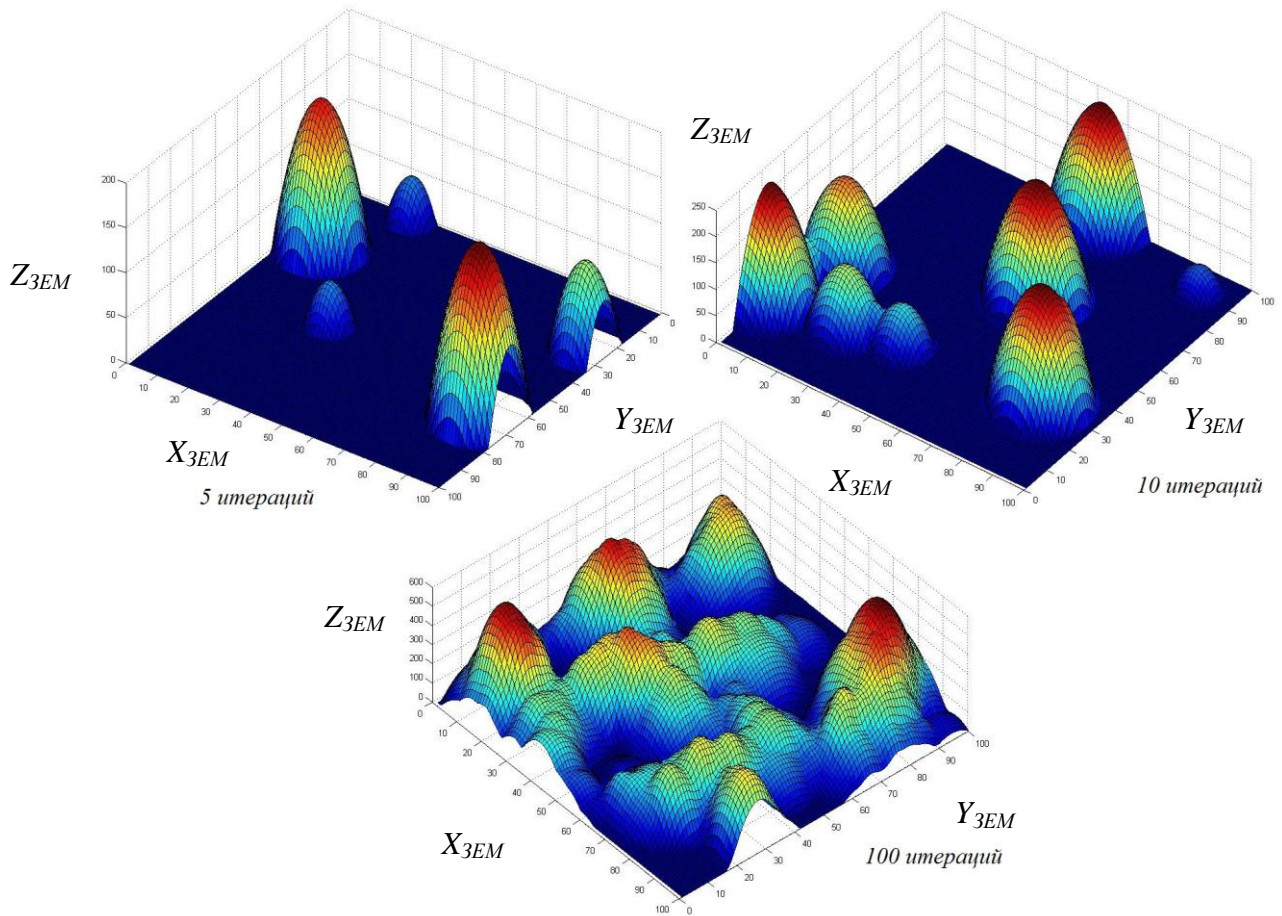


Рисунок 3.6.2 – Внешний вид поверхности после различного числа итераций [193]

Нормализация микрорельефа

При генерации значений для микрорельефа не учитываются выходы этих значений за заданные пределы. Для этого необходимо произвести нормализацию значений. Нормализация – это процесс получения значений из одного предела, и перевод его в другие пределы [170,193].

Нормализации производится по следующей формуле [170,193]:

$$z(x, y)_{norm} = \frac{z(x, y) - z_{min}}{z_{max} - z_{min}}, \quad (3.6.2)$$

На рисунке 3.6.3 приведена блок-схема описанного алгоритма генерации трехмерного микрорельефа. После выполнения всех шагов будет сформирован микрорельеф, нормализованный и готовый к дальнейшему использованию. При этом возмущающее воздействие усредняется по площадке пятна контакта с микропрофилем по формуле (1.4.12).



Рисунок 3.6.3 – Блок-схема алгоритма генерации трехмерного микрорельефа

3.7. Математическая модель взаимодействия рабочего органа с грунтом

Выбор модели процесса взаимодействия РО с разрабатываемым грунтом в данной работе базируется на следующих предпосылках: обеспечение требуемой точности геометрических параметров земляного сооружения происходит на завершающих проходах ДСМ по обрабатываемому участку, грунт при этом, как правило, разрыхлен, а толщина срезаемой стружки грунта не более 0,07 м. Сопротивление копанию зависит от физико-механических свойств грунта, толщины стружки, параметров РО [229,230,231].

Принятые предпосылки позволяют рассматривать силу сопротивления

копанию как сосредоточенную величину, состоящую из двух слагаемых: тренда и флюктуации [216,217,229,230,231]

$$\bar{F}_{PO} = \bar{F}_T + \bar{F}_\phi, \quad (3.7.1)$$

где \bar{F}_{PO} – вектор силы реакции разрабатываемого грунта на РО; \bar{F}_T – вектор сил низкочастотной составляющей силы реакции (тренд); \bar{F}_ϕ – вектор сил высокочастотной составляющей силы реакции (флюктуация).

Корреляционные функции флюктуаций при резании грунтов аппроксимируются выражением [216,217,229,230,231]

$$R_\phi(\tau) = D_\phi e^{-\alpha_\phi |\tau_K|} \cdot \cos \beta_\phi \tau_K, \quad (3.7.2)$$

где D_ϕ – дисперсия флюктуации; α_ϕ , и β_ϕ – параметры корреляционной функции; τ_K – интервал времени корреляции.

Вектор силы реакции высокочастотной составляющей может быть представлен его компонентами, значения которых зависят от предела прочности разрабатываемого грунта.

Принятие допущений о том, что процесс копания осуществляется ножом криволинейного профиля постоянного радиуса кривизны с острой режущей кромкой, позволяет принять математическую модель низкочастотной составляющей силы реакции (тренда) со стороны разрабатываемого грунта на РО [229,230]

$$F_{TX} = (E_X + E_Y \cdot \mu_1) \sin^2 \varphi + F_{ПРХ} \sin \varphi, \quad (3.7.3)$$

где F_{TX} – компонента вектора силы сопротивления копанию; E_X, E_Y – компоненты вектора силы сопротивления резанию; μ_1 – коэффициент трения грунта по металлу; φ – угол захвата РО; $F_{ПРХ}$ – сила сопротивления перемещению призмы волочения при лобовом копании.

При косом резании компоненты вектора силы сопротивления резанию определяются по формулам [229,230]

$$E_{X\varphi} = E_X \cdot \sin^2 \varphi; \quad (3.7.4)$$

$$E_{Y\varphi} = E_Y \cdot \sin^2 \varphi; \quad (3.7.5)$$

$$E_{z\varphi} = E_x \cdot \cos\varphi. \quad (3.7.6)$$

Сила сопротивления перемещению призмы волочения определяется по формулам [229,230]

$$F_{ПРХ} = 0,5 \cdot g \cdot \gamma_\rho \cdot L_{PO} \cdot H_\Gamma^2 \frac{\cos^2(\rho_\Gamma + \varepsilon_\Gamma)}{\cos^2 \varepsilon_\Gamma \cdot \cos(\rho_0 - \varepsilon_\Gamma)}; \quad (3.7.7)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_\Gamma = \arcsin\left(\cos\alpha_P - \frac{h_\Gamma}{R_\Gamma}\right) - \arcsin\frac{H_0}{2R_\Gamma} + \\ + \frac{1}{2} \arcsin\sqrt{1 - \left(\cos\alpha_P - \frac{h_\Gamma}{R_\Gamma}\right)^2 - \frac{\alpha_P}{2}}; \end{aligned} \quad (3.7.8)$$

$$H_\Gamma = 2R_\Gamma \sin 0,5 \left[2 \arcsin\frac{H_0}{2R_\Gamma} - \arccos\left(\cos\alpha_P - \frac{h_\Gamma}{R_\Gamma}\right) + \alpha_P \right], \quad (3.7.9)$$

где g – ускорение свободного падения; γ_ρ – объемная масса грунта в призме волочения; L_{PO} – длина ПО; H_Γ – высота отвала по хорде без участка, погруженного в грунт; ε_Γ – угол, образованный вертикалью и линией, соединяющей верхнюю точку отвала с точкой его контакта с поверхностью разрабатываемого грунта; ρ_0 – угол внешнего трения; ρ_Γ – угол внутреннего трения грунта; α_P – угол резания; h_Γ – толщина срезаемой стружки; R_Γ – радиус кривизны отвала; H_0 – высота отвала по хорде.

Значения компонентов E_x и E_y определяются из системы уравнений [229,230]

$$E_x = M_{1R} \cdot h_\Gamma \cdot L_{PO} [K_{1R}(0,5\gamma_\Gamma g h_\Gamma + C_\Gamma \operatorname{ctg}\rho_\Gamma) - C_\Gamma \cdot \operatorname{ctg}\rho_\Gamma]; \quad (3.7.10)$$

$$E_y = M_{2R} \cdot h_\Gamma \cdot L_{PO} [K_{1R}(0,5\gamma_\Gamma g h_\Gamma + C_\Gamma \operatorname{ctg}\rho_\Gamma) - C_\Gamma \cdot \operatorname{ctg}\rho_\Gamma]; \quad (3.7.11)$$

$$M_{1R} = 1 + \operatorname{tg}\rho_0 \cdot \operatorname{tg}(\beta_\Gamma - 0,5\omega_\Gamma); \quad (3.7.12)$$

$$M_{2R} = \operatorname{tg}(\beta_\Gamma - 0,5\omega_\Gamma) - \operatorname{tg}\rho_0; \quad (3.7.13)$$

$$\begin{aligned} K_{1R} = \frac{\cos\rho_0 \left(\cos\rho_0 + \sqrt{\sin^2\rho_\Gamma - \cos^2\rho_0} \right)}{\cos^2\rho_\Gamma (1 - \sin\rho_\Gamma)} \times \\ \times \left(\sin\rho_\Gamma \cdot \cos\varphi_{1R} + \sqrt{1 - \sin^2\rho_\Gamma \cdot \sin^2\varphi_{1R}} \right)^2; \end{aligned} \quad (3.7.14)$$

$$\omega_{\Gamma} = \arccos\left(\cos\alpha_P - \frac{h_{\Gamma}}{R_{\Gamma}}\right) - \alpha_P; \quad (3.7.15)$$

$$\varphi_{1R} = \frac{\pi}{2} + \beta_{\Gamma} - \frac{\omega_{\Gamma}}{2} - \frac{\rho_0}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \rho_0}{\sin \rho_{\Gamma}}, \quad (3.7.16)$$

где γ_{Γ} – объемная масса грунта; β_{Γ} – угол, образованный подпорной стенкой и вертикалью; ω_{Γ} – центральный угол дуги ножа криволинейного профиля, погруженного в грунт; C_{Γ} – коэффициент сцепления грунта.

Проведенный анализ предшествующих работ по теориям копания грунта РО ДСМ показал, что для достижения поставленной в данной работе цели процесс взаимодействия подсистемы РО с подсистемой разрабатываемый грунт может быть представлен математической моделью (3.7.1), отражающей низкочастотную составляющую (тренд) сопротивления копанию, представленную детерминированными выражениями сил реакции разрабатываемого грунта на РО от физико-механических свойств грунта, толщины срезаемой стружки, параметров призмы волочения, формы отвала, а также высокочастотную составляющую (флюктуацию), вызванную случайными явлениями (неоднородностью грунта, механическими включениями в грунт, переменным значением толщины стружки грунта, неуправляемыми колебаниями РО и др.).

3.8. Кинематика процесса поворота колесной дорожно-строительной машины

Кинематика процесса поворота ДСМ является одной из важнейших подсистем сложной динамической системы. Математическому описанию данного процесса посвящено большое количество работ [34,97,98,111,140,168,180,191,206,207,208,211,212,213,215].

При составлении плоских расчетных схем поворота ДСМ были приняты следующие допущения:

- колеса ДСМ не отрываются от поверхности и имеют с ней постоянный точечный контакт;

- буксование и юз колес ДСМ не учитываются;
- угол поворота передних управляемых колес является средним значением углов поворота правого и левого колес.

3.8.1. Дорожно-строительная машина с передними поворотными колесами

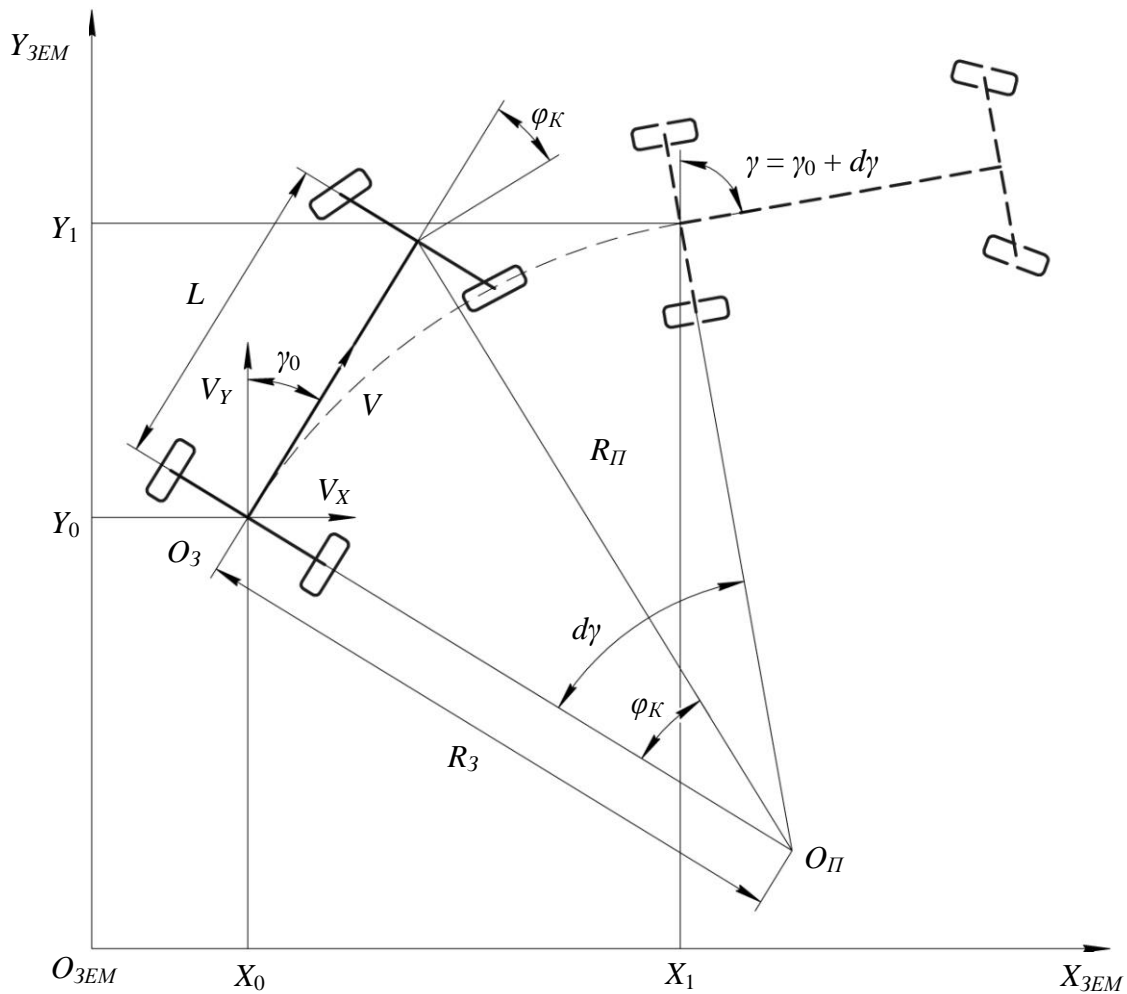


Рисунок 3.8.1 – Плоская расчетная схема процесса поворота дорожно-строительной машины с передними поворотными колесами

При повороте ДСМ с передними поворотными колесами (рис. 3.8.1) элементарное перемещение центральной точки заднего моста O_3 можно определить по формуле [191]:

$$dS = R_3 d\gamma, \quad (3.8.1)$$

откуда

$$Vdt = R_3 d\gamma, \quad (3.8.2)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{V}{R_3}, \quad (3.8.3)$$

где dS – элементарное перемещение центральной точки заднего моста; R_3 – радиус поворота центральной точки заднего моста; V – скорость машины; $d\gamma$ – элементарное изменение курсового угла машины.

Радиусы поворота ДСМ можно определить по формулам [61,71,83,162,163]

$$R_3 = \frac{L}{\operatorname{tg} \varphi_K}; \quad (3.8.4)$$

$$R_{II} = \frac{L}{\sin \varphi_K}, \quad (3.8.5)$$

где R_{II} – радиус поворота центральной точки переднего моста; φ_K – угол поворота передних колес; L – длина базы машины.

Подставив формулу (3.8.4) в формулу (3.8.3) получаем [191]

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{V}{L} \operatorname{tg} \varphi_K. \quad (3.8.6)$$

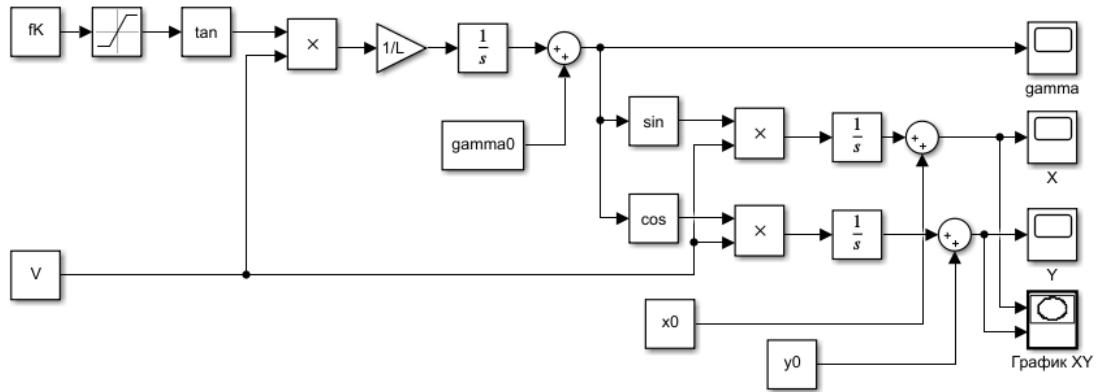


Рисунок 3.8.2 – Структурная схема математической модели процесса поворота дорожно-строительной машины с передними поворотными колесами

Вектор скорости центральной точки заднего моста можно разложить на проекции скорости по осям $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}$ и $O_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}$ [191]:

$$V_x = V \sin \gamma, \quad (3.8.7)$$

$$\frac{dx}{dt} = V \sin \gamma; \quad (3.8.8)$$

$$V_y = V \cos \gamma, \quad (3.8.9)$$

$$\frac{dy}{dt} = V \cos \gamma. \quad (3.8.10)$$

Совокупность формул (3.8.4), (3.8.8) и (3.8.10) можно представить в виде структурной схемы математической модели поворота ДСМ с передними управляемыми колесами (рисунок 3.8.2) [191].

3.8.2. Дорожно-строительная машина с шарнирно-сочлененной рамой

При повороте ДСМ с ШСР (рис. 3.8.3) будут справедливы формулы (3.8.1) – (3.8.3).

Радиусы поворота ДСМ с ШСР можно определить по формулам [191]

$$R_3 = \frac{L_{2p} \cdot \cos \varphi_p + L_{1p}}{\sin \varphi_p}; \quad (3.8.11)$$

$$R_{II} = \frac{L_{1p} \cdot \cos \varphi_p + L_{2p}}{\sin \varphi_p}, \quad (3.8.12)$$

где φ_p – угол складывания полурам; L_{1p} – расстояние от передней оси до шарнира складывания полурам; L_{2p} – расстояние от шарнира складывания полурам до задней оси.

Подставив формулу (3.8.10) в формулу (3.8.3) получаем [191]

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{V \cdot \sin \varphi_p}{L_{2p} \cdot \cos \varphi_p + L_{1p}}. \quad (3.8.13)$$

Вектор скорости центральной точки заднего моста можно разложить на скорость по осям $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}$ и $O_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}$ по формулам (3.8.7) – (3.8.10).

Совокупность формул (3.8.13), (3.8.8) и (3.7.10) можно представить в виде структурной схемы математической модели поворота ДСМ с ШСР (рисунок 3.8.4).

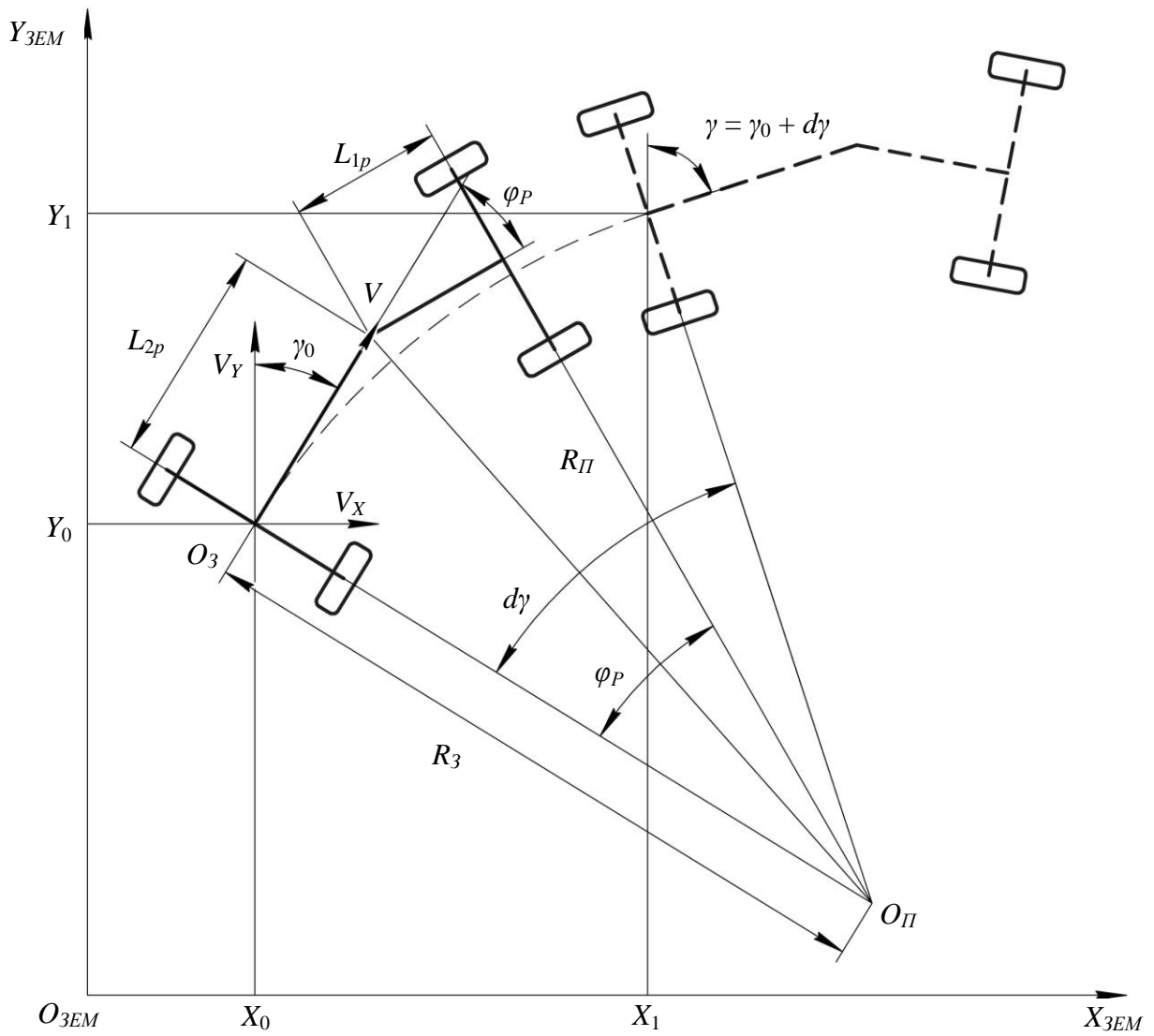


Рисунок 3.8.3 – Плоская расчетная схема процесса поворота дорожно-строительной машины с шарнирно-сочлененной рамой

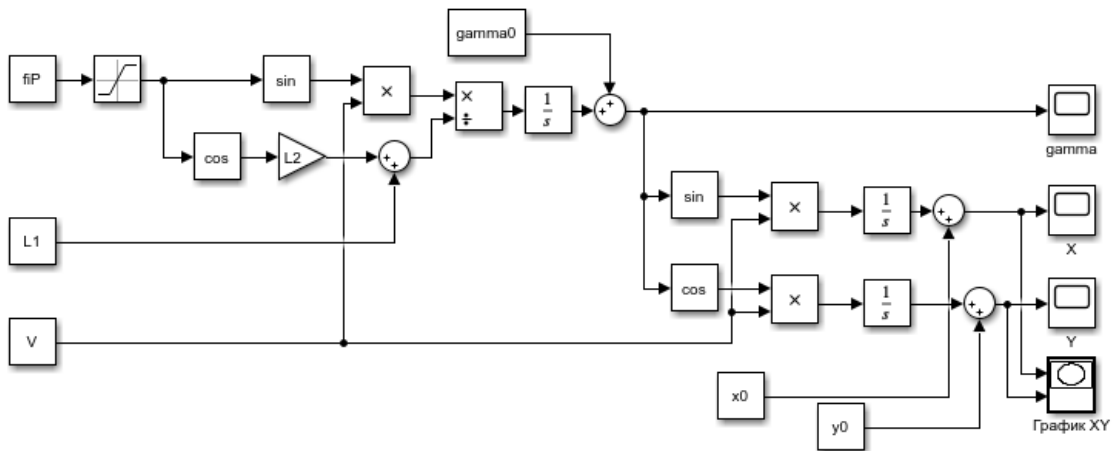


Рисунок 3.8.4 – Структурная схема математической модели процесса поворота дорожно-строительной машины с шарнирно-сочлененной рамой

3.8.3. Дорожно-строительная машина с шарнирно-сочлененной рамой и передними поворотными колесами

При повороте ДСМ с ШСР и передними поворотными колесами (рис. 3.8.5) будут справедливы формулы (3.8.1) – (3.8.3). Радиусы поворота ДСМ с ШСР и передними поворотными колесами можно определить по формулам [191,225]:

$$R_3 = \frac{L_{2p} \cdot \cos(\varphi_P + \varphi_K) + L_{1p} \cdot \cos \varphi_K}{\sin(\varphi_P + \varphi_K)}. \quad (3.8.14)$$

$$R_{II} = \frac{L_{2p} + L_{1p} \cdot \cos \varphi_P}{\sin(\varphi_P + \varphi_K)}. \quad (3.8.15)$$

Подставив формулу (3.8.14) в формулу (3.8.3) получаем [191,194]

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{V \cdot \sin(\varphi_P + \varphi_K)}{L_{2p} \cdot \cos(\varphi_P + \varphi_K) + L_{1p} \cdot \cos \varphi_K}. \quad (3.8.16)$$

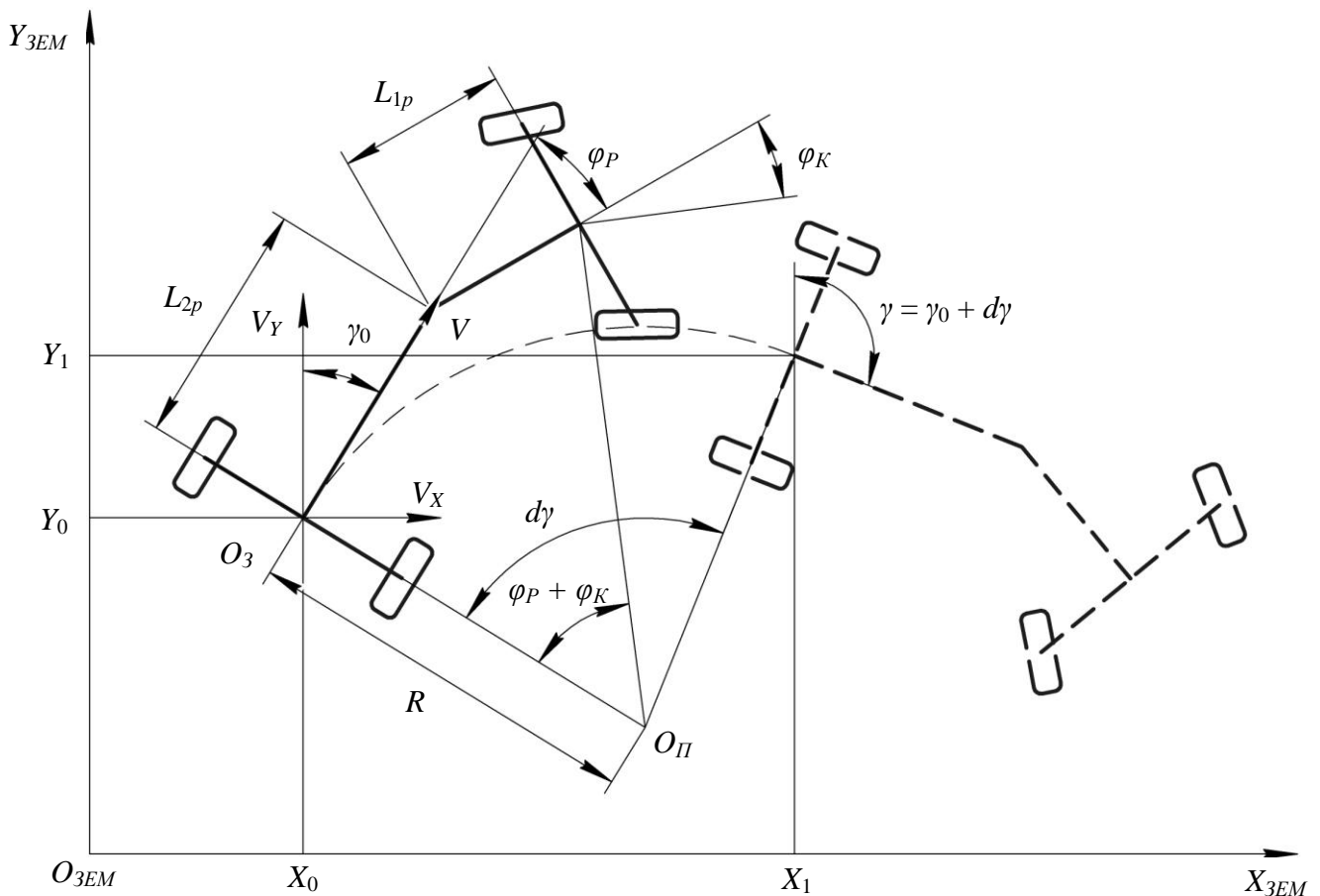


Рисунок 3.8.5 – Плоская расчетная схема процесса поворота дорожно-строительной машины с шарнирно-сочлененной рамой и передними поворотными колесами

Вектор скорости центральной точки заднего моста можно разложить на скорость по осям $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}$ и $O_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}$ по формулам (3.8.7) – (3.8.10).

Совокупность формул (3.8.16), (3.8.8) и (3.8.10) можно представить в виде структурной схемы математической модели поворота ДСМ с ШСР и передними поворотными колесами (рисунок 3.8.6) [191,194].

Формулы (3.8.14), (3.8.15) являются универсальными для всех типов ДСМ с любым типом рулевого управления. Для перехода к формулам (3.8.11), (3.8.12) достаточно принять угол поворота колес φ_K равным нулю, а для перехода к формулам (3.8.4), (3.8.5) к нулю уже необходимо приравнять φ_P и вместо L_{1P} и L_{2P} подставить их сумму L .

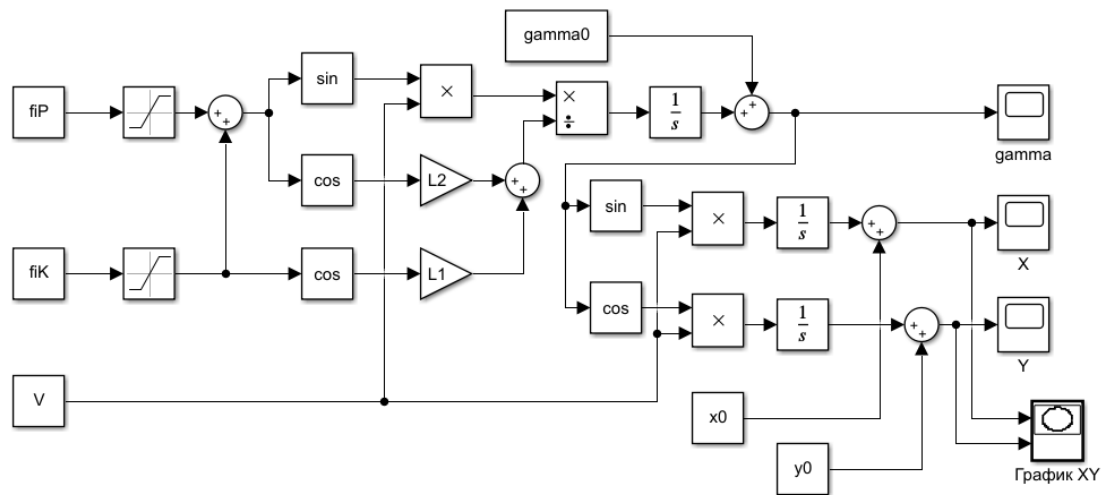


Рисунок 3.8.6 – Структурная схема математической модели процесса поворота дорожно-строительной машины с шарнирно-сочлененной рамой и передними поворотными колесами

3.9. Динамика процесса поворота колесной дорожно-строительной машины

Кинематика процесса поворота колесных ДСМ, описанная в п. 3.8, не может с достаточной точностью описать все процессы и силовые взаимодействия, происходящие в подсистеме «ХО – грунт – РО». Для математического описания динамики процесса поворота колесной ДСМ была составлена плоская расчетная схема поворота автогрейдера с передними поворотными колесами и ШСР (рис.

3.9.1). Как видно из п. 3.8 математические модели ДСМ с передними поворотными колесами и ДСМ с ШСР могут быть представлены из данной математической модели путем приравнивания углов поворота колес или угла складывания полурам к нулю [90,92,97,98,156,180,209,211,212,213,215].

Движение машины, представленной на рис. 3.9.1 может быть описано системой уравнений [90,92,97,98,156,180,209,211,212,213,215]:

$$\begin{cases}
 m\ddot{x} = \left(\sum_{i=3}^6 T_i \right) \cos \gamma - \left(\sum_{i=3}^6 F_{rix} \right) \cos \gamma + \left(\sum_{i=3}^6 F_{riy} \right) \sin \gamma - \left(\sum_{i=1}^2 F_{rix} \right) \cos(\gamma + \varphi_P + \varphi_K) - \\
 - \left(\sum_{i=1}^2 F_{riy} \right) \sin(\gamma + \varphi_P + \varphi_K) - F_{POx} \sin(\gamma + \varphi_P) - F_{POy} \cos(\gamma + \varphi_P); \\
 m\ddot{y} = \left(\sum_{i=3}^6 T_i \right) \sin \gamma - \left(\sum_{i=3}^6 F_{rix} \right) \sin \gamma + \left(\sum_{i=3}^6 F_{riy} \right) \cos \gamma - \left(\sum_{i=1}^2 F_{rix} \right) \sin(\gamma + \varphi_P + \varphi_K) - \\
 - \left(\sum_{i=1}^2 F_{riy} \right) \cos(\gamma + \varphi_P + \varphi_K) - F_{POx} \cos(\gamma + \varphi_P) - F_{POy} \sin(\gamma + \varphi_P); \\
 J\ddot{\varphi} = (T_4 + T_6 - T_3 - T_5 + F_{r3x} + F_{r5x} - F_{r4x} - F_{r6x}) \frac{L_{3p}}{2} - \\
 - (F_{r3y} + F_{r4y}) \left(L_O - \frac{L_{\delta}}{2} \right) - (F_{r5y} + F_{r6y}) \left(L_O + \frac{L_{\delta}}{2} \right) + \\
 + F_{POx} (L_{2p} - L_O) \sin \varphi_P + F_{POy} (L_{1p} - L_1 + (L_{2p} - L_O) \cos \varphi_P) - \\
 - F_{r1x} \left(L_{1p} \sin \varphi_K + (L_{2p} - L_O) \sin(\varphi_K + \varphi_P) - \frac{L_{3p}}{2} \cos \varphi_K \right) - \\
 - F_{r2x} \left(L_{1p} \sin \varphi_K + (L_{2p} - L_O) \sin(\varphi_K + \varphi_P) + \frac{L_{3p}}{2} \cos \varphi_K \right) + \\
 + F_{r1y} \left(L_{1p} \cos \varphi_K + (L_{2p} - L_O) \cos(\varphi_K + \varphi_P) - \frac{L_{3p}}{2} \sin \varphi_K \right) + \\
 + F_{r2y} \left(L_{1p} \cos \varphi_K + (L_{2p} - L_O) \cos(\varphi_K + \varphi_P) + \frac{L_{3p}}{2} \sin \varphi_K \right),
 \end{cases} \quad (3.9.1)$$

где m – масса машины; x – перемещение центра масс машины (точка O) вдоль оси $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}$; y – перемещение центра масс машины (точка O) вдоль оси $O_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}$; T_i – сила тяги на ведущих колесах машины; F_{rix} – продольная сила реакции на колесах машины; F_{riy} – поперечная сила реакции на колесах машины; φ – угол азимута машины; φ_P – угол складывания полурам машины; φ_K – средний угол поворота

передних колес машины; F_{POx} – продольная сила реакции грунта на РО; F_{POy} – поперечная сила реакции грунта на РО; J – момент инерции машины; L_{1p} – длина передней полурамы машины; L_{2p} – длина задней полурамы машины; L_{3p} – ширина машины; L_{δ} – длина балансира; L_O – расстояние от оси балансиров до центра масс машины (точка O).

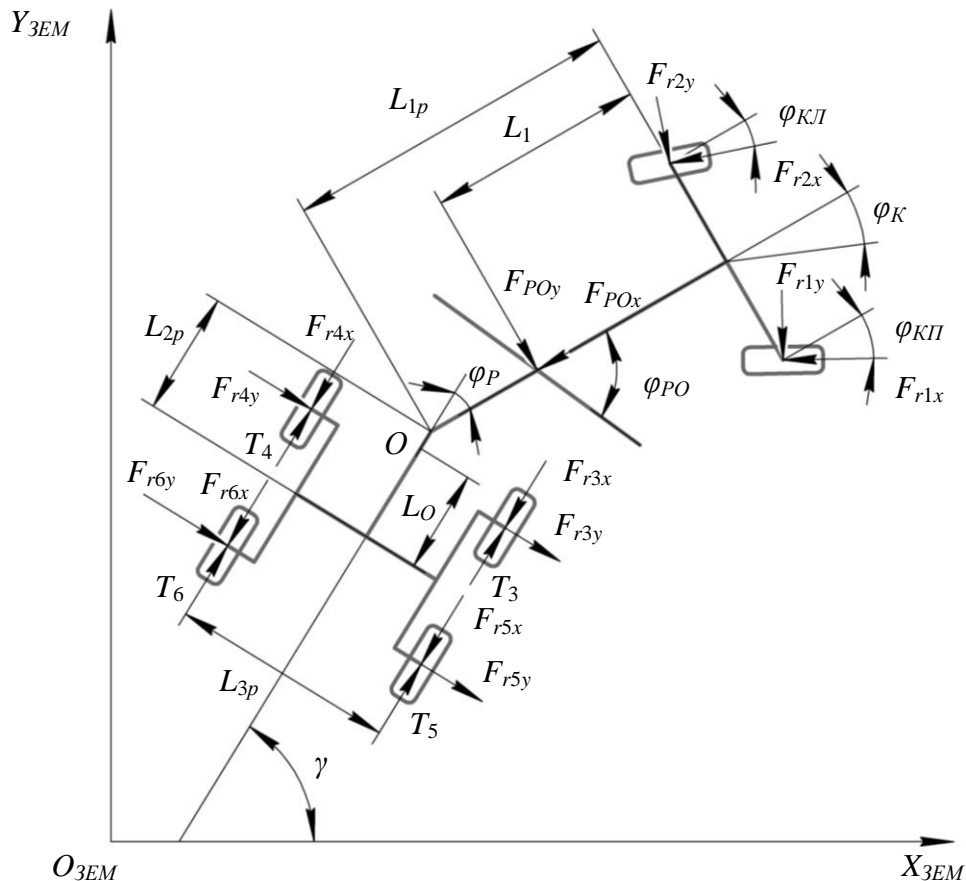


Рисунок 3.9.1 – Плоская расчетная схема динамики процесса поворота автогрейдера с передними поворотными колесами и шарнирно-сочлененной рамой

На основании расчетной схемы и предложенной математической модели динамики процесса поворота (3.9.1) была составлена структурная схема математической модели в обозначениях MATLAB Simulink (см. рис. 3.9.2).

Для определения продольных и боковых составляющих сил реакции на колесах была составлена плоская расчетная схема сил, действующих на автогрейдер в вертикальной плоскости (рис. 3.9.3).

Отношение вертикальной и горизонтальной проекций силы сопротивления копанию грунта у автогрейдеров обычно находится в пределах $\rho = F_{POz}/F_{POx} = 0,15 \div 0,20$ [211,212,213].

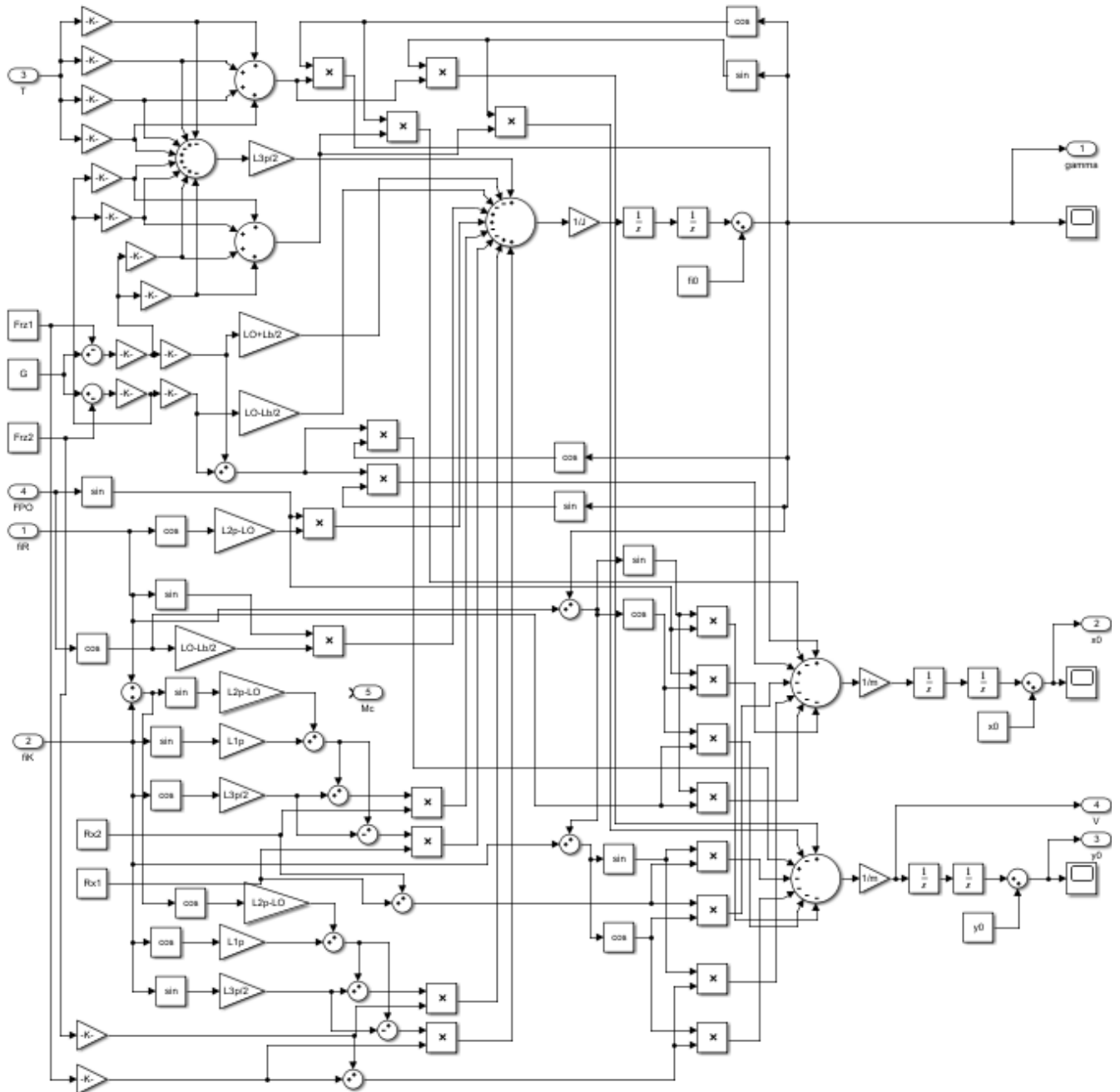


Рисунок 3.9.2 – Структурная схема математической модели динамики поворота автогрейдера в обозначениях MATLAB Simulink

Сила тяги, развиваемая ведущими колесами автогрейдера зависит от вертикальной реакции на соответствующем колесе [211,212,213]

$$T_i = \theta_{\text{мяг}} f_{\text{ц}} F_{\text{riz}}, \quad (3.9.2)$$

где $\theta_{\text{мяг}}$ – коэффициент, учитывающий степень использования максимальной силы тяги колесного тягача ($\theta_{\text{мяг}} = 0,70 - 0,73$ при буксовании $\delta = 20\%$); $f_{\text{ц}}$ – коэффициент сцепления шины с грунтом.

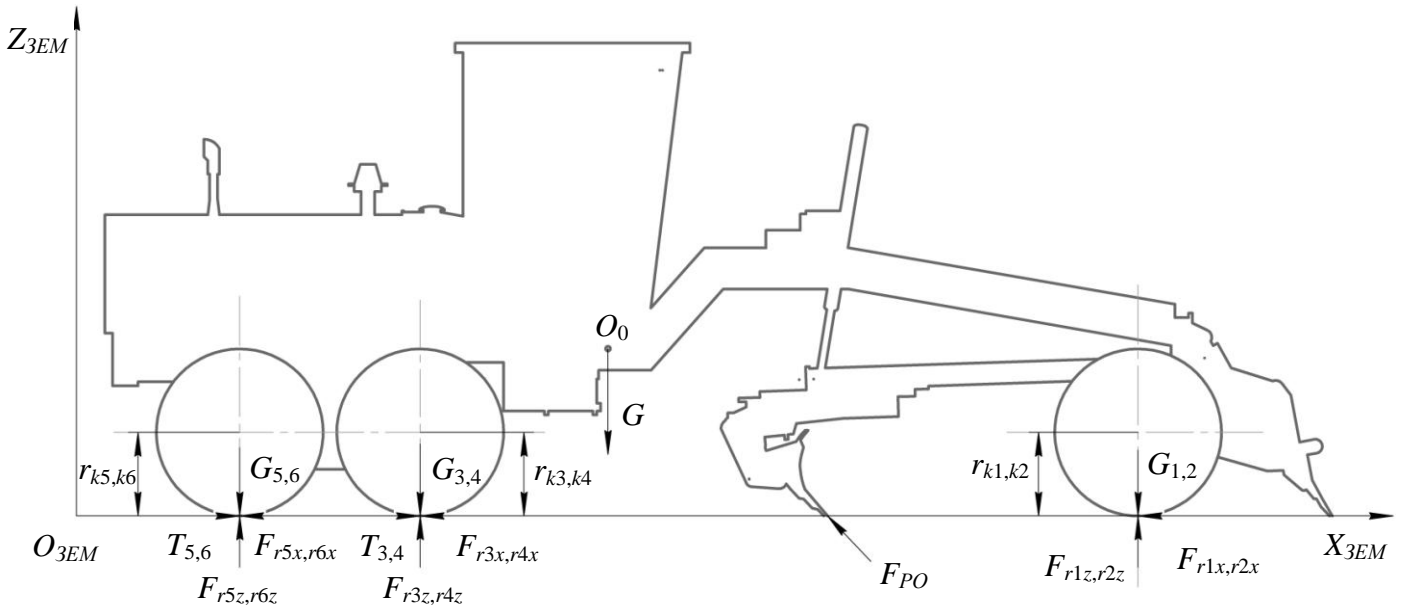


Рисунок 3.9.3 – Плоская расчетная схема сил, действующих на автогрейдер в вертикальной плоскости

Таким образом, вертикальная составляющая реакции на передних (ведомых) колесах может быть представлена в виде [211,212,213]

$$F_{\text{rz.пер}} = \frac{-G[(L_{2p} - L_O)(1 + \rho\theta_{\text{мяг}}f_{\text{ц}}) - L_{2p} - \theta_{\text{мяг}}f_{\text{ц}}h_p]}{[L_{1p}(1 + \rho\theta_{\text{мяг}}f_{\text{ц}}) + L_{2p} + \theta_{\text{мяг}}f_{\text{ц}}h_p]}, \quad (3.9.3)$$

на задних (ведущих) колесах [211,212,213]

$$F_{\text{rz.зад}} = \frac{G - F_{\text{rz.пер}}}{1 + \rho\theta_{\text{мяг}}f_{\text{ц}}}. \quad (3.9.4)$$

Боковые составляющие сил реакций на колесах выполняют роль удерживающих связей. Предельное значение этих усилий можно определить с помощью зависимости [211,212,213]

$$F_{\text{riy}} = f_{\text{ц.бок}} \cdot F_{\text{riz}}, \quad (3.9.5)$$

где $f_{cy,бок}$ – коэффициент сцепления колеса с опорной поверхностью в боковом направлении по отношению к направлению качения.

Если обозначить суммарные боковые активные силы, действующие на колеса, соответственно $\sum F_{i,бок}$, то в аналитической форме можно записать [211,212,213]

$$F_{riy} = \begin{cases} \sum F_{i,бок}, & \text{при } \sum F_{i,бок} \leq f_{cy,бок} \cdot F_{riz}; \\ f_{cy,бок} \cdot F_{riz}, & \text{при } \sum F_{i,бок} > f_{cy,бок} \cdot F_{riz}. \end{cases} \quad (3.9.6)$$

Продольные составляющие реакций на колесах являются силами сопротивления перекачиванию и зависят от вертикальных составляющих силы реакции и типа опорной поверхности [211,212,213]

$$F_{rix} = f_{cy} \cdot F_{riz}. \quad (3.9.7)$$

Важной составляющей математической модели динамики процесса поворота колесной ДСМ является математическая модель качения колеса по деформируемому основанию. Для описания данной модели была составлена расчетная схема (рисунок 3.9.4) [211,212,213].

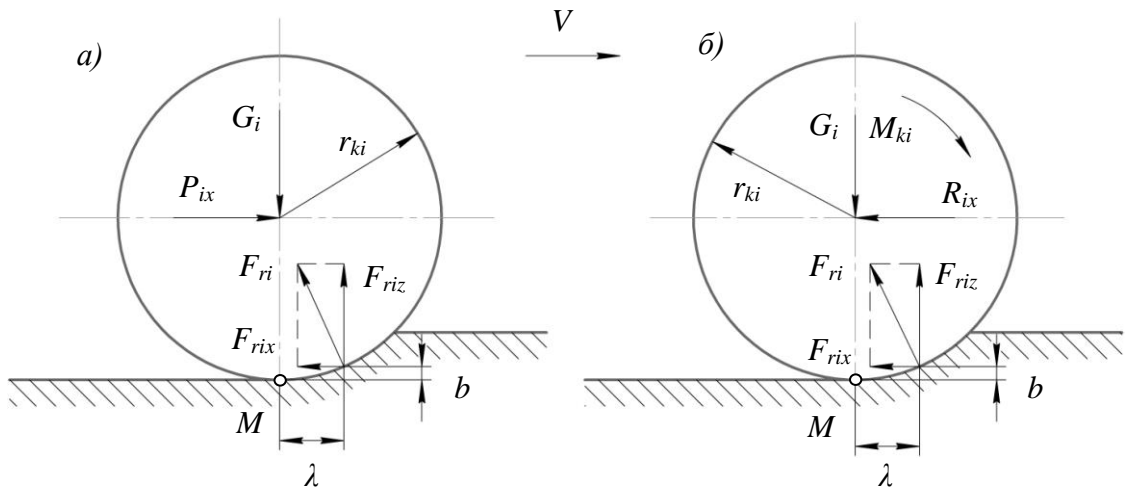


Рисунок 3.9.4 – Расчетная схема качения ведомого (а) и ведущего (б) колес по деформируемому основанию

Под действием вертикальной нагрузки G_i и толкающей силы P_{ix} грунт сминается под колесом, а равнодействующая его реакции F_{ri} проходит через ось колеса. Ее составляющие находятся из рассмотрения проекций сил на горизонтальную и вертикальную оси [211,212,213]:

$$F_{riz} = G_i; F_{rix} = P_{ix}. \quad (3.9.8)$$

Из уравнения моментов сил относительно точки M

$$P_{ix} \cdot r_{ki} = F_{riz} \cdot \lambda + F_{rix} \cdot b, \quad (3.9.9)$$

учитывая (3.9.8) получим

$$P_{ix} = G_i \cdot \lambda / (r_{ki} - b). \quad (3.9.10)$$

В формуле (3.9.10) коэффициент сопротивления качению $f = \lambda / (r_{ki} - b)$ зависит от механических свойств грунта. Таким образом, сила, которую необходимо приложить к колесу для его равномерного движения [211,212,213]

$$F_{rix} = G_i \cdot f. \quad (3.9.11)$$

Движение ведущего колеса отличается от движения ведомого наличием крутящего момента, приложенного к его оси (рисунок 3.9.4). Уравнения равновесия колеса можно записать в виде [211,212,213]:

$$\begin{cases} F_{riz} = G_i; \\ M_{ki} = P_{ix} \cdot r_{ki} + F_{riz} \cdot \lambda + F_{rix} \cdot b. \end{cases} \quad (3.9.12)$$

Из соотношений, выведенных для ведомого колеса, следует [211,212,213]

$$F_{rix} \cdot \lambda + F_{rix} \cdot b = F_{riz} \cdot \lambda + F_{rix} \frac{\lambda}{r_{ki} - b} b = \frac{F_{riz} \cdot \lambda}{r_{ki} - b} r_k = F_{rix} \cdot r_{ki}, \quad (3.9.13)$$

тогда последнее соотношение в системе (3.9.12) получает вид

$$M_{ki} / r_{ki} = R_{ix} + F_{rix}. \quad (3.9.14)$$

Величина M_{ki} / r_{ki} является тяговой силой [211,212,213]

$$T_i = M_{ki} / r_{ki}. \quad (3.9.15)$$

Из второго выражения системы (3.9.12) следует, что ведущее колесо способно преодолеть некоторую избыточную силу R_{ix} , равную разности между тяговой силой T_i и силой сопротивления качению колеса $G_i f$, которая через опоры ведущего моста передается на остов ДСМ и может быть реализована на преодоление сопротивления качению ведомых колес, сопротивления перемещению РО и ускорение ДСМ [211,212,213].

Тяговая сила определяется крутящим моментом двигателя M и параметрами силовой передачи

$$T_i = M i_{TP} \eta_{TP} / r_{ki}, \quad (3.9.16)$$

где i_{TP} , η_{TP} – передаточное число и КПД трансмиссии ДСМ.

Представленная математическая модель динамики процесса поворота ДСМ является универсальной для машин с любыми типами рулевого управления и была использована в данной работе.

3.10. Математическая модель гидропривода

Математические модели элементов гидропривода достаточно подробно описаны в работах [23,50,63,65,117,160,166,198,199,229,230,231].

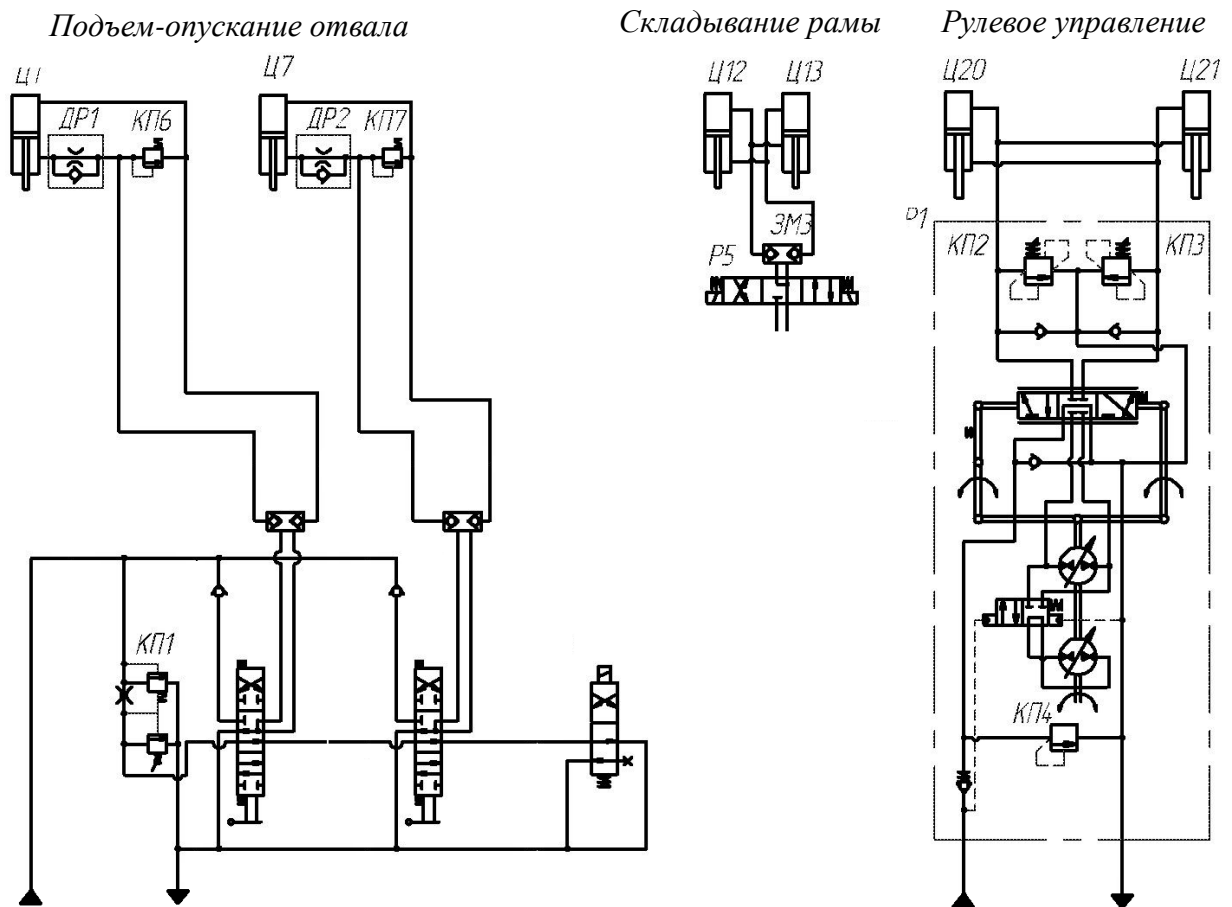


Рисунок 3.10.1 – Гидравлические схемы рабочего органа и рулевого управления автогрейдера

При составлении математической модели гидропривода были приняты следующие основные допущения [229,230,231]:

- объемный модуль упругости рабочей жидкости в период исследуемого процесса постоянен;
- инерционные свойства потока рабочей жидкости не учитываются;
- волновые процессы в гидроэлементах не учитываются;
- параметры гидроэлементов сосредоточены;
- потери давления по длине гидролинии определяются средними значениями расходов жидкости на входе и выходе гидролинии;
- утечки жидкости в гидроэлементах не учитываются;
- сжимаемости жидкости в рабочих полостях гидронасоса и гидромотора не учитываются;
- неравномерность подачи гидронасоса и неравномерность расхода гидромотора не учитываются;
- силы сухого трения не учитываются.

Гидравлические схемы современных ДСМ достаточно сложны и состоят из большого числа элементов. Для достижения поставленной в работе цели нет нужды рассматривать и описывать всю гидравлическую схему, поэтому остановимся на двух контурах: рулевое управление (в т.ч. складывание рамы) и подъем-опускание РО (рисунок 3.10.1).

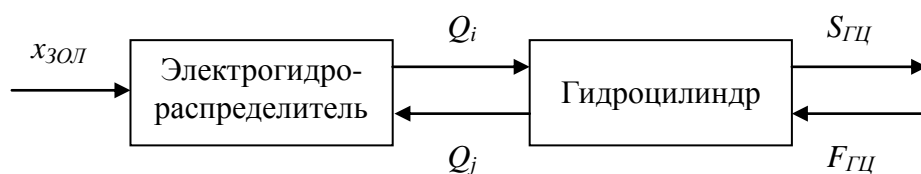


Рисунок 3.10.2 – Структурная схема гидропривода рабочего органа и складывания полурам

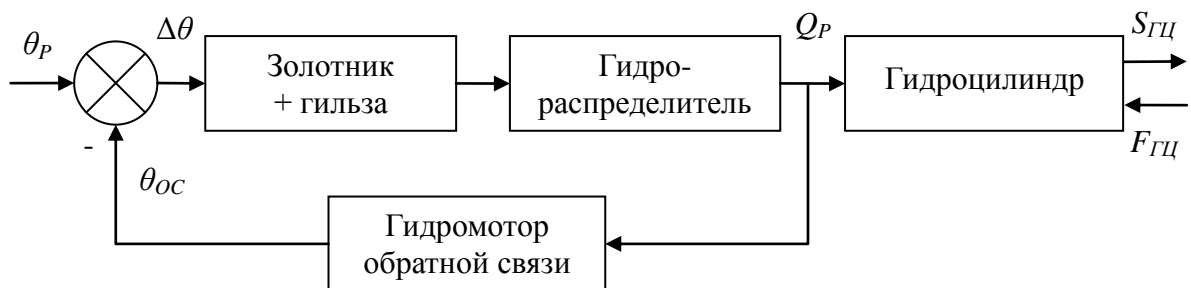


Рисунок 3.10.3 – Структурная схема гидравлического рулевого управления

Поскольку в данной работе не стоит цель исследования гидравлических элементов и гидравлической схемы ДСМ, то теоретических исследований с учетом принятых допущений целесообразно будет рассмотреть математические модели гидроцилиндров и золотников, определяющие скорости перемещения штоков гидроцилиндров при постоянной подаче гидронасоса (рисунки 3.10.2, 3.10.3).

Математическая модель гидроцилиндра

Динамика гидроцилиндра может быть описана посредством уравнения поступательного движения поршня под действием сил давления, внешней нагрузки и уравнений расходов на входе и выходе с учетом сжимаемости жидкости в полостях. На основании принятого допущения об отсутствии утечек в гидроцилиндре через резиновые уплотнения уравнения движения штока гидроцилиндра можно представить в виде [229,230,231]

$$\dot{V}_{\text{ц}} = \frac{1}{m} (P_i \cdot S_i - P_j \cdot S_j - b_{\text{ТР}} \cdot V_{\text{ц}} - F_{\text{ц}}); \quad (3.10.1)$$

$$\dot{P}_i = \frac{Q_i - S_i \cdot V_{\text{ц}}}{k_{\text{УПР},i}}; \quad \dot{P}_j = \frac{Q_j + S_j \cdot V_{\text{ц}}}{k_{\text{УПР},j}}, \quad (3.10.2)$$

где $V_{\text{ц}}$ – скорость перемещения штока гидроцилиндра; m – приведенная к штоку масса подвижных частей рабочего оборудования; P_i, P_j – давления соответственно в напорной и сливной полостях гидроцилиндра; Q_i, Q_j – расходы жидкости соответственно в напорной и сливной гидроцилиндра; S_i, S_j – рабочие площади соответственно в напорной и сливной полостях гидроцилиндра; $b_{\text{ТР}}$ – коэффициент вязкого трения; $F_{\text{ц}}$ – внешние силы, приведенные к штоку гидроцилиндра; $k_{\text{УПР},i}, k_{\text{УПР},j}$ – коэффициенты упругости соответственно напорной и сливной полостей гидроцилиндра.

$$k_{\text{УПР},i} = (\Delta V_{\text{ц}} + 0,25 \cdot \pi \cdot S \cdot d_{\text{ц}}^2) \cdot \left(\frac{1}{E_{\text{ж}}} + \frac{d_{\text{ц}}}{\delta_{\text{ц}} \cdot E_{\text{ц}}} \right), \quad (3.10.3)$$

где $\Delta V_{\text{ц}}$ – “мертвый” объем поршневой полости гидроцилиндра; S – положение штока гидроцилиндра, характеризующее объем поршневой полости; $\delta_{\text{ц}}$ – толщина стенки гидроцилиндра; $E_{\text{ц}}$ – модуль упругости материала стенки гидроцилиндра.

$$k_{УПР.j} = \left[\Delta V_{Ш} + 0,25 \cdot \pi \cdot (S_{MAX} - S) \cdot (d_{Ц}^2 - d_{Ш}^2) \right] \cdot \left(\frac{1}{E_{Ж}} + \frac{d_{Ц}}{\delta_{Ц} \cdot E_{Ц}} \right), \quad (3.10.4)$$

где $\Delta V_{Ш}$ – “мертвый” объем штоковой полости гидроцилиндра; S_{MAX} – максимальное значение хода штока гидроцилиндра.

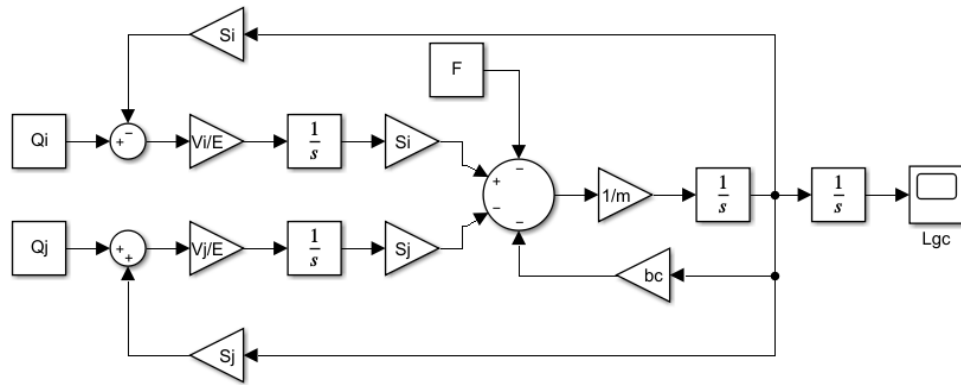


Рисунок 3.10.4 – Структурная схема гидроцилиндра

Уравнения (3.10.1)...(3.10.4) позволяют представить гидроцилиндр в виде структурной схемы (рисунок 3.10.4).

Математическая модель электрогидрораспределителя

Электрогидравлические распределители достаточно хорошо изучены и имеют различные математические модели, которые зависят от принятых при их описании допущений.

Принятые в работе допущения позволяют принять динамическую модель электрогидравлического распределителя предложенную в [229,230,231]:

$$m_{30Л} \frac{d^2 x_{30Л}}{dt^2} + b_3 \frac{dx_{30Л}}{dt} + c_3 x_{30Л} = c_1 \cdot i_P; \quad (3.10.5)$$

$$x_{30Л MIN} \leq x_{30Л} \leq x_{30Л MAX}, \quad (3.10.6)$$

где c_1 – линеаризованный коэффициент пропорциональности между током в обмотках электромагнита и силой тяги электромагнита; b_3 – коэффициент вязкого трения в золотнике; c_3 – коэффициент жесткости пружин, удерживающих золотник в нейтральном положении; $m_{30Л}$ – масса сердечника электромагнита и золотника.

Передаточная функция электрогидравлического распределителя с учетом времени запаздывания $\tau_{30Л}$ [229,230,231]:

$$W_{30Л}(p) = \frac{x_{30Л.МАХ}(p)}{i_p(p)} = \frac{k_1 \cdot e^{-\tau_{30Л} p}}{T_{30Л1}^2 p^2 + T_{30Л2} p + 1}, \quad (3.10.7)$$

где $k_1 = \frac{c_1}{c_3}$ – коэффициент передачи; $T_{30Л1}^2 = \frac{m_3}{c_3}$ и $T_{30Л2} = \frac{b_3}{c_3}$ – постоянные времени; $\tau_{30Л}$ – время запаздывания электрогидравлического распределителя; p – оператор Лапласа.

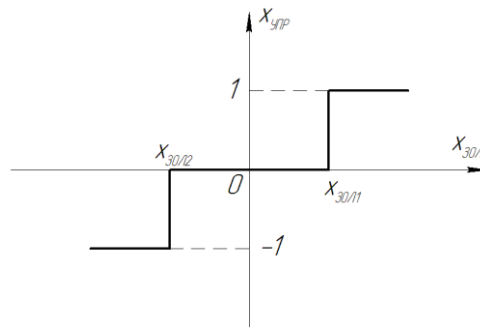


Рисунок 3.10.5 – Сигнал управления переключением участков структурной схемы гидроцилиндра

Гидрораспределитель представляет собой сочетание местных сопротивлений, образованных каналами золотника, и описывается уравнениями расходов через регулируемый дроссель [201,229,230,231]:

$$Q_{PH} = Q_H = \mu \cdot f_H \cdot \text{sign}(P_H - P_{PH}) \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{Ж}^{-1} \cdot |P_H - P_{PH}|}, \quad (3.10.8)$$

где Q_{PH} и Q_H – расходы, соответственно, на выходе и на входе напорного канала золотника; P_{PH} и P_H – давления, соответственно на выходе и на входе напорного канала золотника; f_H – площадь проходного сечения местных сопротивлений в напорном канале золотника; $\rho_{Ж}$ – плотность рабочей жидкости.

Поскольку значения давлений в сливной гидролинии сравнительно малы, сжимаемостью жидкости можно пренебречь [201,229,230,231]:

$$Q_C = Q_{PC} = \mu \cdot f_C \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{Ж}^{-1} \cdot P_{PC}}, \quad (3.10.9)$$

где Q_C и Q_{PC} – расходы, соответственно, на выходе и на входе сливного канала

золотника; μ – коэффициент расхода; f_C – площадь проходного сечения местных сопротивлений в сливном канале золотника; $\rho_{Ж}$ – плотность рабочей жидкости.

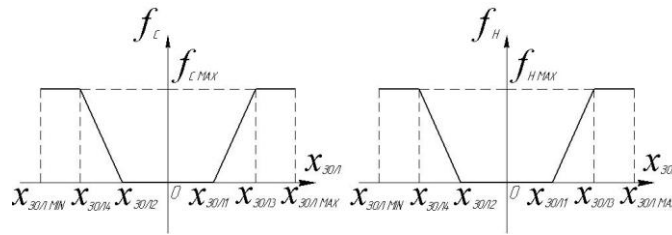


Рисунок 3.10.6 – Площади проходных сечений каналов золотника

Золотник гидравлического рулевого управления

Золотник ГРУ представлен в виде одномассового звена. Передаточная функция золотника ГРУ, представлена апериодическим звеном второго порядка. Расход рабочей жидкости через отверстия золотника пропорционален площади проходных отверстий золотника [229,231]:

$$W(p) = \frac{Q_1(p)}{\theta(p)} = \frac{K_{ГРМ}}{T_{1ГРМ}^2 p^2 + T_{2ГРМ} p + 1}, \quad (3.10.10)$$

где $K_{ГРМ}$ – коэффициент передачи; $T_{1ГРМ}^2$ и $T_{2ГРМ}$ – постоянные времени; p – оператор Лапласа; $Q_1(p)$ – расход жидкости через отверстия золотника; $\theta(p)$ – угол поворота золотника.

Уравнение статической характеристики зависимости расхода рабочей жидкости (Q) от площади проходных отверстий золотника (A) [229,231]:

$$Q = \begin{cases} 0, \text{ при } |A| \leq a_1; \\ k_1(A - a_1), \text{ при } a_1 < A < a_2; \\ k_1(A + a_1), \text{ при } -a_2 < A < -a_1; \\ Q_n \cdot \text{sign}A, \text{ при } |A| > a_2, \end{cases} \quad (3.10.11)$$

где $k_1 = Q_n / (a_2 - a_1)$.

Гидромотор обратной связи

Поток рабочей жидкости из гидрораспределителя через ГМОС попадает в исполнительные ГЦ. ГМОС осуществляет отрицательную обратную связь посредством смещения гильзы гидрораспределителя на угол θ_{OC} , регулируя площади проходных сечений каналов гидрораспределителя [229,231].

Передаточная функция ГМОС представлена идеальным усилительным звеном [229,231]:

$$W_{oc}(p) = \frac{\theta_{oc}(p)}{Q_n(p)} = K_{oc}, \quad (3.10.12)$$

где K_{oc} – коэффициент передачи ГМОС, соответствующий угловой скорости поворота гильзы гидрораспределителя, которая определяется по следующей зависимости [229,231]:

$$\dot{\theta}_{oc} = \frac{Q_n}{q_n}, \quad (3.10.13)$$

где $\dot{\theta}_{oc}$ – угловая скорость поворота гильзы ГМОС, об/с; q_n – рабочий объем ГМОС, м³.

3.11. Математическая модель силовой установки

Динамическая модель подсистемы «двигатель-регулятор» может быть представлена в виде структурной схемы (рисунок 3.11.1) [120].

При теоретических исследованиях наибольший интерес представляют неустановившиеся режимы работы двигателя, поэтому дальнейшие вычисления будут исходить из этого допущения [120].

В неустановившемся режиме нарушаются условия статического равновесия вращающихся частей двигателя, в результате чего в двигателе оказывается избыточное или недостаточное количество энергии. Это очень хорошо видно из уравнения баланса моментов, составленном в соответствии с принципом Даламбера [120]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (3.11.1)$$

где J – приведенный к валу двигателя момент инерции вращающихся частей (коленчатый вал и присоединенные к нему движущиеся массы); ω – угловая скорость вращения вала; M – эффективный вращающий момент на валу; M_c – момент сопротивления на валу.

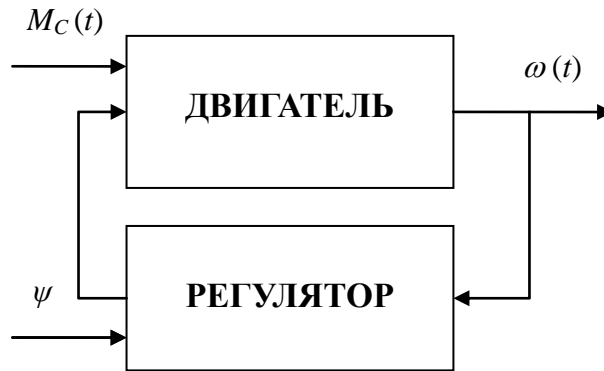


Рисунок 3.11.1 – Структурная схема силовой установки

$\omega(t)$ – текущая величина угловой скорости вала дизеля;

$M_C(t)$ – момент сопротивления на валу двигателя; ψ – управляющее воздействие

Для дальнейшего описания произведем замену [120]:

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega, \quad M = M_0 + \Delta M, \quad M_C = M_{C0} + \Delta M_C. \quad (3.11.2)$$

Т.к. $M_0 - M_{C0} = 0$, то

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta M - \Delta M_C. \quad (3.11.3)$$

Момент сопротивления M_C зависит от угловой скорости ω и настройки потребителя N [120]

$$M_C = f(\omega; N). \quad (3.11.4)$$

Характеристика (3.11.4) в общем случае нелинейна, однако при малых значениях $\Delta\omega$ такую характеристику можно аппроксимировать линейным участком путем разложения зависимости (3.11.4) в ряд Тейлора [120]:

$$\begin{aligned} M_{C0} + \Delta M_C = & M_{C0} + \left(\frac{\partial M_C}{\partial \omega} \right)_{N_0} \cdot \Delta\omega + \left(\frac{\partial^2 M_C}{\partial \omega^2} \right)_{N_0} \cdot \frac{\Delta\omega^2}{2!} + \dots \\ & \dots + \left(\frac{\partial M_C}{\partial N} \right)_{\omega_0} \cdot \Delta N + \left(\frac{\partial^2 M_C}{\partial N^2} \right)_{\omega_0} \cdot \frac{\Delta N^2}{2!} + \dots \end{aligned} \quad (3.11.5)$$

При малых значениях $\Delta\omega$ и ΔN членами разложения со второй и более высокими степенями $\Delta\omega$ и ΔN можно пренебречь, т.е. зависимость (3.11.4) линеаризовать (заменить касательной, проведенной к точке характеристики, соответствующей выбранному равновесному режиму при M_{C0} , ω_0 и N_0). В этом случае [120]:

$$\Delta M_c = \left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega} \right)_{N_0} \cdot \Delta \omega + \left(\frac{\partial M_c}{\partial N} \right)_{\omega_0} \cdot \Delta N. \quad (3.11.6)$$

Крутящий момент двигателя определяется цикловой подачей топлива и полнотой его сгорания. Последнее зависит от количества воздуха, поступающего в камеру сгорания. Так как цикловая подача топлива определяется положением рейки топливного насоса h и угловой скоростью коленчатого вала, то [120]

$$M = f(\omega; h). \quad (3.11.7)$$

Разложение данной функциональной зависимости в ряд Тейлора и последующая линеаризация позволяют получить зависимость [120]

$$\Delta M = \left(\frac{\partial M}{\partial h} \right)_{\omega_0} \cdot \Delta h + \left(\frac{\partial M}{\partial \omega} \right)_{h_0} \cdot \Delta \omega. \quad (3.11.8)$$

Подставив выражения (3.11.6) и (3.11.8) в уравнение (3.11.3), приводим его к виду [120]

$$J \frac{d\Delta \omega}{dt} + \left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega} - \frac{\partial M}{\partial \omega} \right) \cdot \Delta \omega = \frac{\partial M}{\partial h} \cdot \Delta h + \frac{\partial M_c}{\partial N} \cdot \Delta N. \quad (3.11.9)$$

Последующий анализ динамических свойств двигателя оказывается наиболее удобным, если в уравнении (3.11.9) использовать безразмерные относительные координаты [120]

$$\varphi = \frac{\Delta \omega}{\omega_0}, \quad \chi = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad \alpha_D = \frac{\Delta N}{N_0}; \quad (3.11.10)$$

$$T_D \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = k_\chi \cdot \chi - k_D \cdot \alpha_D, \quad (3.11.11)$$

где $T_D = \frac{J}{F_D}$ – постоянная времени двигателя, с; $F_D = \frac{\partial M_c}{\partial \omega} - \frac{\partial M}{\partial \omega}$ – фактор

устойчивости двигателя, Н·м·с; $K_\chi = \left(\frac{\partial M}{\partial h} \right) \cdot h_0 / (F_D \cdot \omega_0)$ – коэффициент усиления

по положению рейки, с⁻¹; $K_D = \left(\frac{\partial M_c}{\partial N} \right) \cdot N_0 / (F_D \cdot \omega_0)$ – коэффициент усиления по

нагрузке, с⁻¹.

Таким образом, согласно принципу суперпозиции, структурную схему

двигателя можно представить совокупностью двух апериодических звеньев (рисунок 3.11.2)

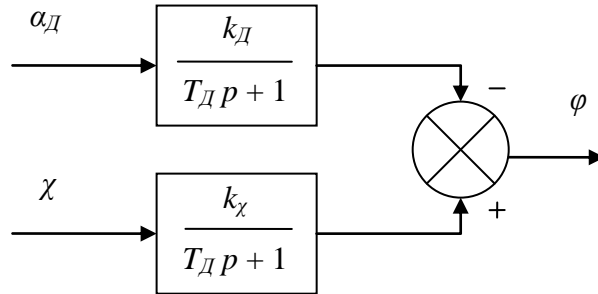
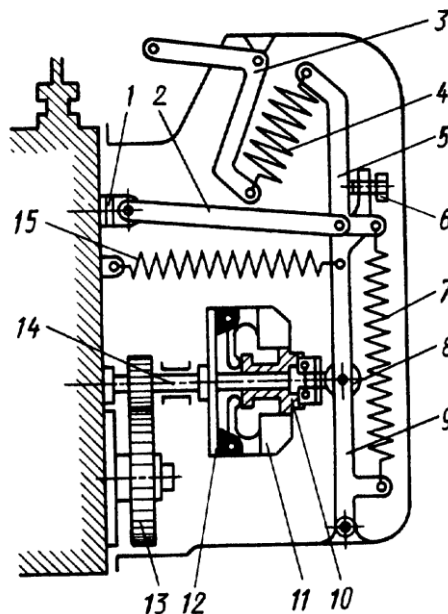


Рисунок 3.11.2 – Структурная схема двигателя внутреннего сгорания

Аналогичным образом можно представить математическую модель всережимного регулятора (рис. 3.11.3), который устанавливается на большинство дизельных двигателей ДСМ.



1 – рейка; 2 – тяга; 3, 5, 9 – рычаги; 4, 7, 15 – пружины; 6 – винт; 8 – ролик;
10 – муфта; 11 – груз; 12 – траверса; 13 – повышающая зубчатая передача; 14 – валик.

Рисунок 3.11.3 – Схема всережимного регулятора

Уравнение динамического равновесия механического чувствительного элемента, будет иметь вид [120]

$$T_{P1}^2 \frac{d^2 \eta}{dt^2} + T_{P2} \frac{d\eta}{dt} + \eta = k_{P1} \cdot \varphi - k_{P2} \cdot \alpha_P, \quad (3.11.12)$$

где $T_{P1}^2 = \frac{\mu}{F_P}$, $T_{P2} = \frac{\nu}{F_P}$, $k_{P1} = \frac{2E_0}{F_P z_0}$, $k_{P2} = \frac{\partial E}{\partial \psi} \psi_0 / F_P z_0$, $\varphi = \frac{\Delta \omega}{\omega_0}$, $\eta = \frac{\Delta z}{z_0}$, $\alpha_P = \frac{\Delta \psi}{\psi_0}$,

$F_P = \frac{\partial E}{\partial z} - \omega_P^2 \frac{dA}{dz}$ – фактор устойчивости чувствительного элемента, $u_P = \omega_P / \omega$ –

передаточное отношение механизма, связывающего вал двигателя с валом регулятора; E – восстанавливающая сила пружины; z – перемещение муфты регулятора; ω – угловая скорость вала двигателя; ψ – перемещение чашки пружины (управляющее воздействие).

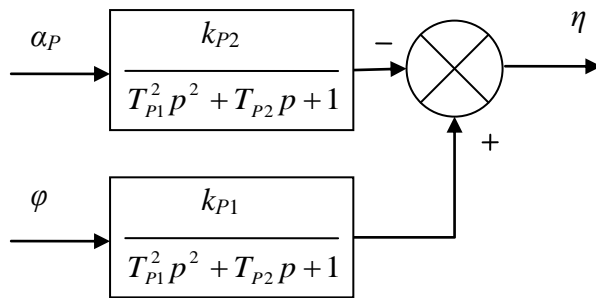


Рисунок 3.11.4 – Структурная схема регулятора

Таким образом, структурная схема подсистемы «нагрузка-двигатель-регулятор» примет вид (рисунок 3.11.5).

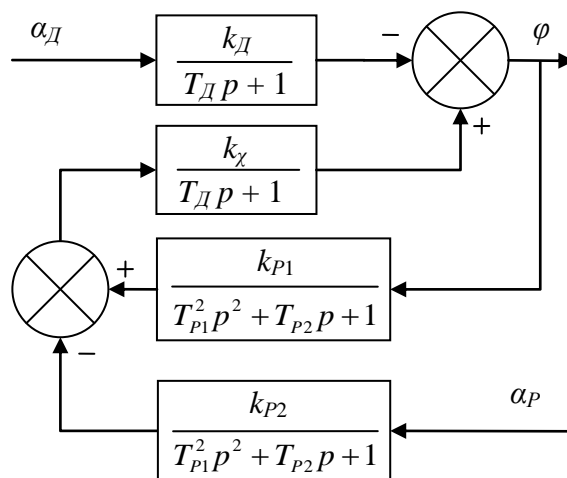


Рисунок 3.11.5 – Структурная схема комплекса «нагрузка-двигатель-регулятор»

3.12. Выводы по третьей главе

1. Рабочий процесс ДСМ представляет собой сложную динамическую систему, основными подсистемами которой являются: микрорельеф, базовая машина, РО – обрабатываемая среда, гидропривод РО, ГРУ, ХО, силовая установка и СУ.

2. Предложенная в работе математическая модель механической системы ДСМ, описанная с помощью метода однородных координат и уравнений Лагранжа второго рода, позволяет получать временные зависимости перемещений частей ДСМ в пространстве при стохастических и детерминированных входных воздействиях.

3. Разработан метод моделирования трехмерной поверхности, что позволяет проводить теоретические исследования криволинейного движения ДСМ.

4. Математическая модель подсистемы взаимодействия РО ДСМ с обрабатываемой средой представлена суммой тренда, представляющего собой среднюю величину усилия на РО, и флуктуации, описывающей случайные колебания усилия сопротивления копания.

5. Кинематика процесса поворота ДСМ с различными типами рулевого управления описана уравнениями радиусов поворота передней и задней осей, курсового угла и представлена в виде структурных схем.

6. Математическая модель динамики процесса поворота ДСМ учитывает влияние сил реакций на колесах ДСМ и силы сопротивления копания грунта, что позволяет проводить теоретические исследования, как рабочего, так и холостого хода ДСМ.

7. Математическая модель подсистемы гидропривода описывает скорости перемещения штоков гидроцилиндров ГРУ и РО с учетом силы сопротивления на штоках.

8. Предложенная математическая модель подсистемы силовой установки и трансмиссии учитывает влияние момента сопротивления на скорость вращения вала ДВС и, следовательно, на скорость перемещения ДСМ.

9. Объединение математических моделей отдельных подсистем формирует обобщенную математическую модель сложной динамической системы рабочего процесса ДСМ, позволяющая моделировать требуемые траектории движения ДСМ при формировании земляного полотна с различным расположением РО относительно базы машины.

ГЛАВА 4. МЕТОДОЛОГИЯ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

4.1. Анализ рабочего процесса ДСМ

Управление любой ДСМ ограничено определенным конечным набором функций, рассмотренных в первой главе. В настоящее время на серийных машинах эти функции выполняет ЧО, при этом на каждую функцию наложены ограничения и существует отдельный критерий эффективности. Но при этом есть некая общая цель, которую необходимо достичь, оптимально выполняя определенный набор функций [188,195].

С целью разработки комплексной системы управления рассмотрим рабочий процесс ДСМ с позиции системного анализа. В блок-схеме приводятся только те подсистемы и связи, которые непосредственно влияют на формирование земляного сооружения с заданной точностью [188,195].

На рисунке 4.1.1 представлена блок-схема сложной динамической системы рабочего процесса серийной ДСМ без использования систем автоматизации [195].

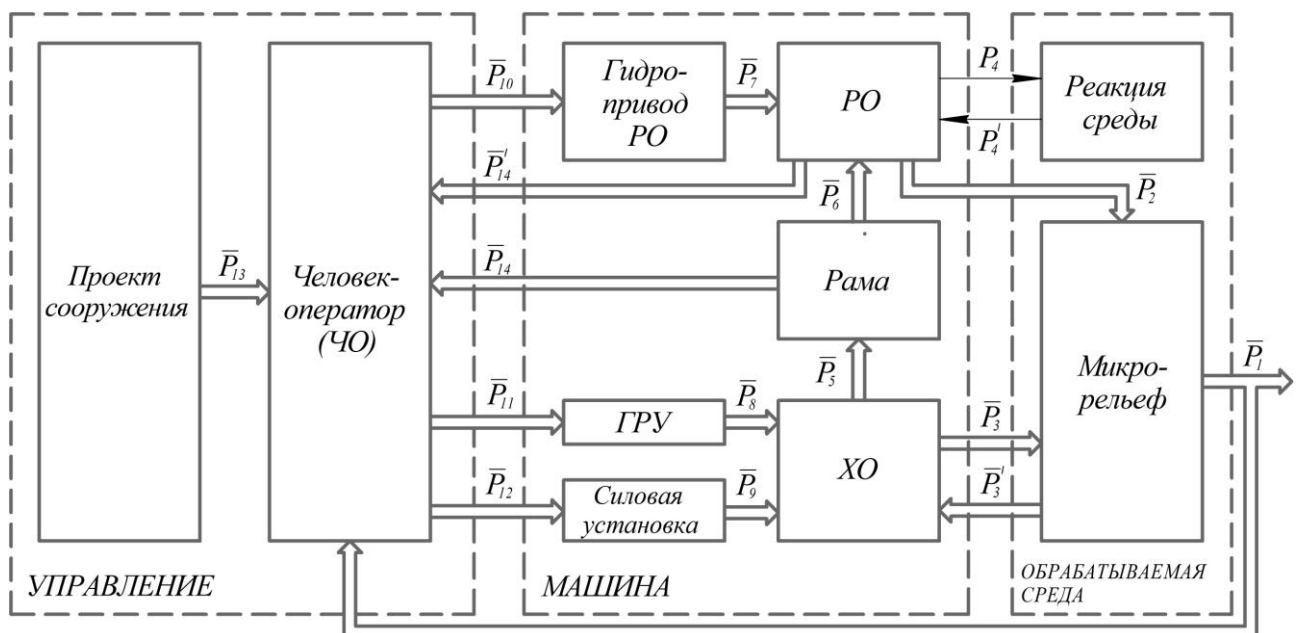


Рисунок 4.1.1 – Блок-схема рабочего процесса дорожно-строительной машины без систем автоматизации

Обрабатываемая среда представлена подсистемами: реакция среды и микрорельеф [195].

ДСМ (машина) представлена подсистемами РО, рама, ходовое оборудование (ХО), гидропривод РО, гидравлическое рулевое управление (ГРУ), силовая установка [195].

Управление представлено подсистемами ЧО, проект сооружения [195].

Подсистемы соединены между собой векторными связями, по которым проходит информация [195].

Реальные геометрические параметры \bar{P}_1 возводимого сооружения, формируемые после прохода ДСМ, являются выходными координатами сложной динамической системы, которые воспринимает ЧО в силу своих возможностей. Полученные данные $\bar{P}_1, \bar{P}_{14}, \bar{P}'_{14}$ ЧО сравнивает с проектными отметками (проект сооружения \bar{P}_{13}) и формирует управляющие воздействия на силовую установку \bar{P}_{12} , ГРУ \bar{P}_{11} и гидропривод РО \bar{P}_{10} [195].

ГРУ, силовая установка и микрорельеф, по которому движется ДСМ, оказывают воздействия на ХО (векторы параметров $\bar{P}_8, \bar{P}_9, \bar{P}'_3$). Ходовое оборудование воспринимает возмущающее воздействие от микрорельефа \bar{P}'_3 и управляющие воздействия от ГРУ \bar{P}_8 и силовой установки \bar{P}_9 изменяет положение рамы машины в инерциальной системе координат (вектор \bar{P}_5). Перемещения рамы (вектор \bar{P}_6) и управляющие воздействия со стороны гидропривода РО (вектор \bar{P}_7) приводят к изменению координат РО, которые формирует возводимое сооружение из необработанного микрорельефа (вектор \bar{P}_2). Со стороны среды на РО действует сила реакции (P'_4), которая зависит от глубины копания РО (P_4), призмы волочения, категории грунта и др. [195].

Существующие на сегодняшний день СУ, которые были описаны в первой главе, выполняют функцию управления РО в двух- или трехмерном режиме. Блок-схема рабочего процесса ДСМ с применением такой СУ приведена на рисунке 4.1.2 [195].

В качестве источников информационных параметров выступают различные датчики, которые устанавливаются либо на раму ДСМ \bar{P}_{14} , либо на РО \bar{P}_{14}' , и система ГНСС \bar{P}_{15} (GPS, ГЛОНАСС и др.), которые позволяют определить текущее положение РО \bar{P}_{16} [195].

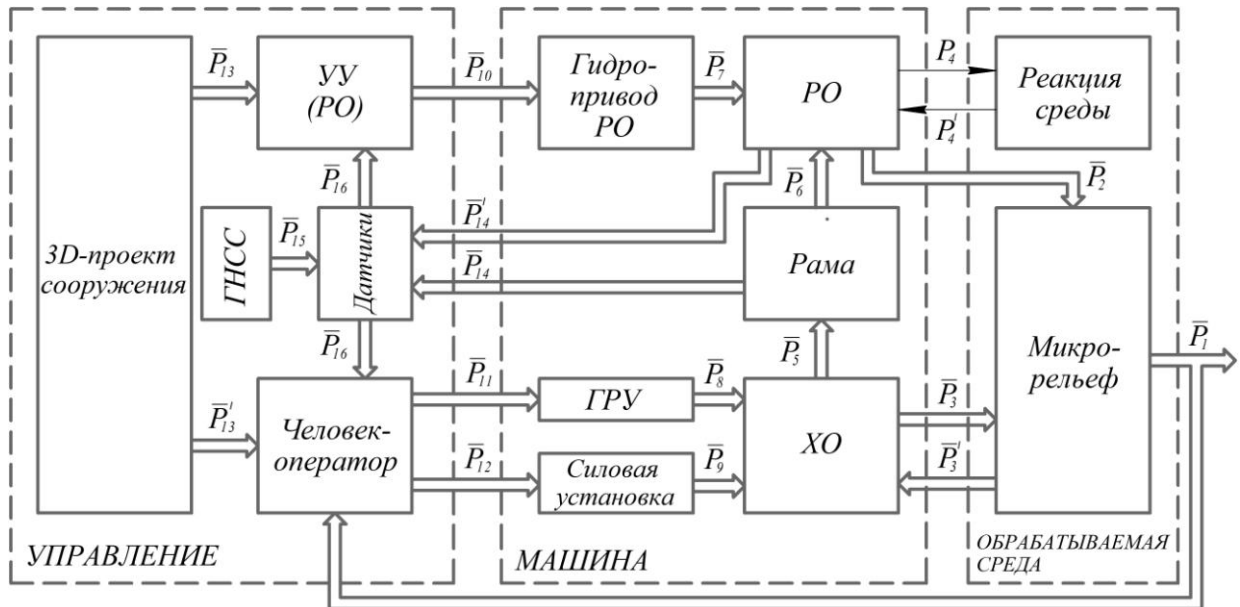


Рисунок 4.1.2 – Блок-схема рабочего процесса дорожно-строительной машины с серийной системой управления

Для функционирования данной системы необходим цифровой 3D-проект сооружения, который позволяет сравнить в режиме реального времени текущее положение РО (вектор \bar{P}_{16}) с проектными отметками (вектор \bar{P}_{13}) [188].

ЧО в данной схеме наблюдает положение ДСМ на площадке и сохраняет за собой управление силовой установкой \bar{P}_{12} и ГРУ \bar{P}_{11} [188].

Перспективным направлением является полное исключение ЧО из контуров управления ДСМ и создание полностью автономных ДСМ. Блок-схема рабочего процесса такой ДСМ представлена на рисунке 4.1.3 [188].

Помимо управления РО на СУ возлагаются функции: построения оптимальной траектории движения ДСМ (вектор \bar{P}_{17}) на основе 3D-проекта сооружения и электронной карты местности (вектор \bar{P}_{13}) с учетом всех параметров ДСМ [188].

4.2. Метод построения траектории движения колесной дорожно-строительной машины

Схема производства работ автогрейдерами зависит от характера работ и типа земляного сооружения. Средняя длина захватки при работе автогрейдера обычно находится в пределах 200-400 м. Технологический процесс производства земляных работ при строительстве земляного полотна автогрейдерами состоит из перемещения грунта из резерва и разравнивания [15,172].

При возведении насыпей из боковых резервов автогрейдеры совершают круговые движения параллельно оси насыпи начиная от краев к середине (рисунок 4.2.1). Операции обычно идут в следующем порядке: зарезание грунта, перемещение грунта, разравнивание грунта, планировка [15,172].

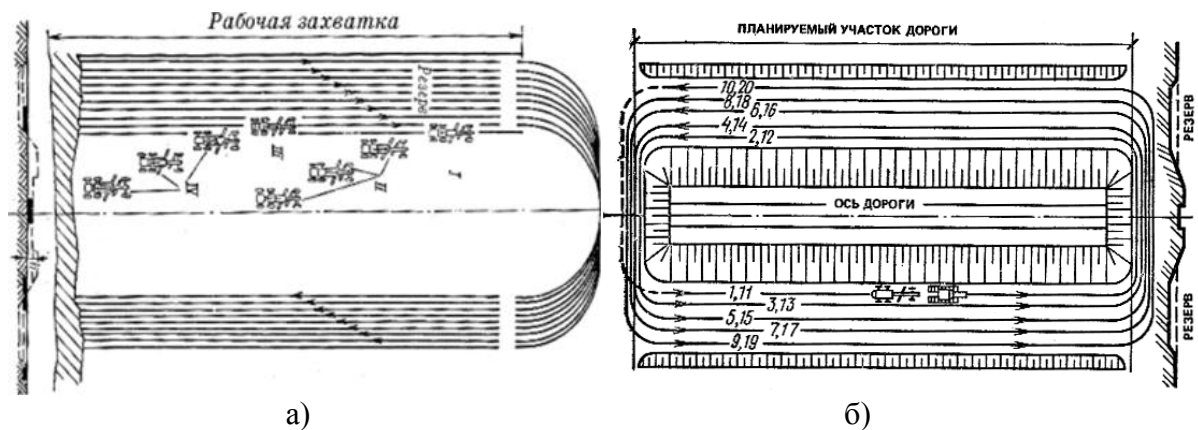


Рисунок 4.2.1 – Схема производства работ при возведении земляного полотна [15]:

- а) при движении автогрейдера «по часовой стрелке»;*
- б) при движении автогрейдера «против часовой стрелки».*

Траекторию движения автогрейдера по площадке можно разбить на рабочий ход – прямые отрезки, ограниченные точками захода на захватку и выхода из нее, и развороты – дуги, соединяющие точки выхода и захода на захватку. Причем заходить на захватку автогрейдер должен после выравнивания курса [15,172].

Таким образом, математическое описание любой траектории можно провести с помощью массива путевых точек, которые автогрейдер должен проходить в

строго определенной последовательности. Помимо координат, путевая точка должна содержать в себе информацию об угле азимута, т.е. направление дальнейшего движения машины, на который должен встать автогрейдер после достижения данной точки (рисунок 4.2.2). Причем точки чередуются: точка захода на захватку, т.е. начало рабочего движения и точка выхода с захватки, начало холостого хода [15,172].

Расположение путевых точек на местности зависит от формы и размеров рабочего участка и зависит от технических параметров конкретного автогрейдера (ширины РО, угла захвата) [15,167].

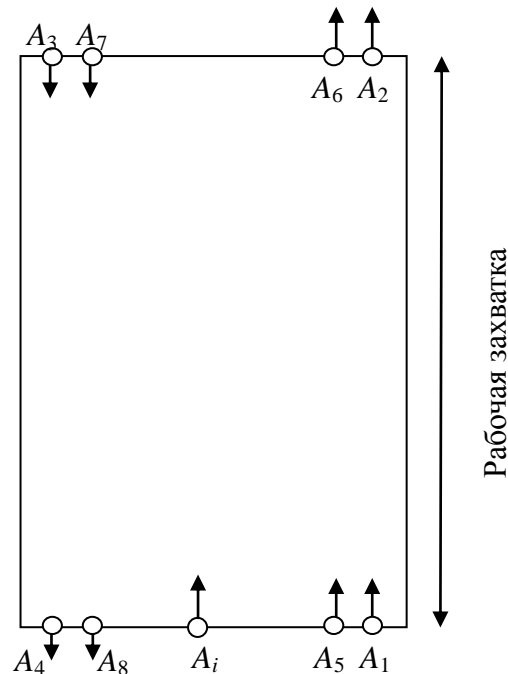


Рисунок 4.2.2 – Массив путевых точек траектории движения автогрейдера

Траектория рабочего хода представляет собой, как правило, движение по прямой, либо по кривой очень большого радиуса. Т.е. азимуты входа и выхода, как правило, совпадают либо отличаются незначительно. Траектория холостого хода, как правило, предполагает разворот машины на угол около 180° и выставление на обратный азимут [15,172].

Азимут машины φ_i отсчитывается от положительной полуоси $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}$ до продольной оси машины. За положительное значение угла φ_i принят поворот против часовой стрелки [15,172].

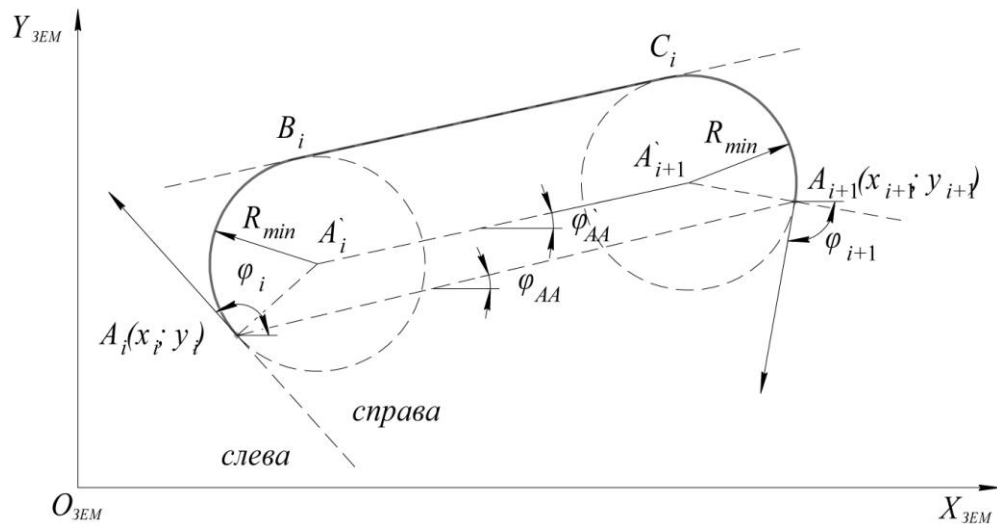


Рисунок 4.2.3 – Расчетная схема построения траектории движения автогрейдера [15,172]

Исходные данные для построения траектории [15,172]:

- а) координаты текущей точки – координаты точки $A_i(x_i, y_i, \varphi_i)$;
- б) координаты целевой точки – координаты точки $A_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, \varphi_{i+1})$;
- в) минимальный радиус поворота машины R_{min} ;

Результат работы алгоритма – траектория от точки A_i до точки A_{i+1} .

Расчетная схема для построения траектории представлена на рисунке 4.2.3. Необходимо построить траекторию из точки A_i с азимутом φ_i до точки A_{i+1} с азимутом φ_{i+1} [15,172].

Кратчайшая траектория движения в данном случае может быть разбита на 3 участка элементарного движения: движение по окружности (поворот) с радиусом R_{min} (минимальный радиус поворота машины) от точки A_i до точки B_i , движение по прямой от точки B_i до точки C_i и движение по окружности (поворот) с радиусом R_{min} от точки C_i до точки A_{i+1} . В точках перехода из одного участка движения в другой необходимо поставить промежуточные путевые точки B_i и C_i [15,172].

Первый вопрос, который решает алгоритм: влево или вправо должна повернуть ДСМ на первом участке, т.е. необходимо знать, справа или слева от линии азимута φ_i находится точка A_{i+1} [15,172].

Для этого достаточно вычислить угол азимута отрезка A_iA_{i+1} и сравнить его с углом φ_i (т.к. функция арктангенса дает значения угла от -90° до 90° , в формулу введено слагаемое, которое позволяет получать значения от -180° до 180°).

$$\varphi_{AA} = 90 \cdot \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{|y_{i+1} - y_i|} \right) \cdot \left(1 - \frac{x_{i+1} - x_i}{|x_{i+1} - x_i|} \right) + \arctan \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{y_{i+1} - y_i} \right). \quad (4.2.1)$$

Если $\varphi_{AA} \geq \varphi_i$, то поворот налево, а если меньше – направо.

Второй вопрос – откуда ДСМ приходит в точку A_{i+1} , слева или справа.

Для этого необходимо сравнить угол азимута φ_{AA} с углом азимута φ_{i+1} . Если $\varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}$, то ДСМ приходит справа, а если меньше – слева [15,172].

В результате возникает 4 варианта взаимного расположения точек (рисунок 4.2.4) [15,172].

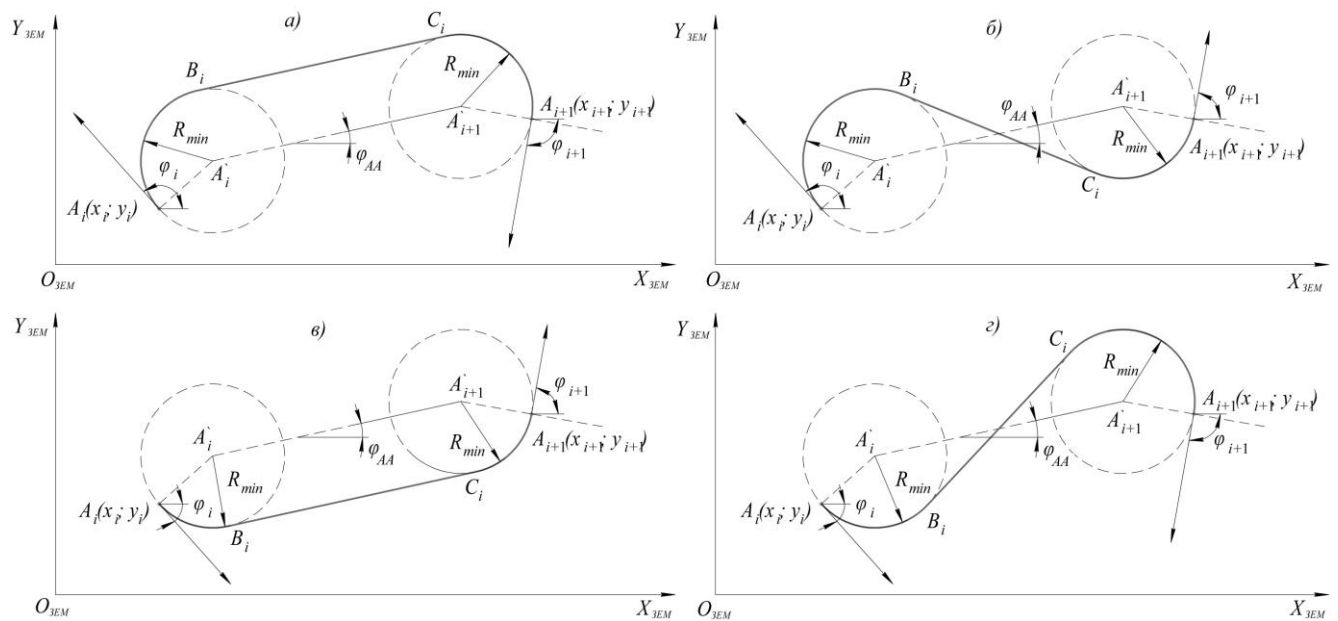


Рисунок 4.2.4 – Расчетные схемы при различных соотношениях углов:

- а) $\varphi_i > \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}$ – направо и направо;
- б) $\varphi_i > \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}$ – направо и налево;
- в) $\varphi_i \leq \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}$ – налево и налево;
- г) $\varphi_i \leq \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}$ – налево и направо.

Координаты центров поворота A'_i, A'_{i+1} вычисляются по формулам [15,172]:

$$x'_i = \begin{cases} x_i + R_{\min} \sin \varphi_i, & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ x_i - R_{\min} \sin \varphi_i, & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases} \quad (4.2.2)$$

$$y'_i = \begin{cases} y_i - R_{\min} \cos \varphi_i, & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ y_i + R_{\min} \cos \varphi_i, & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases} \quad (4.2.3)$$

$$x'_{i+1} = \begin{cases} x_{i+1} - R_{\min} \sin \varphi_i, & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ x_{i+1} + R_{\min} \sin \varphi_i, & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases} \quad (4.2.4)$$

$$y'_{i+1} = \begin{cases} y_{i+1} + R_{\min} \cos \varphi_i, & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ y_{i+1} - R_{\min} \cos \varphi_i, & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases} \quad (4.2.5)$$

Для вычисления координат промежуточных точек B_i и C_i необходимо вычислить угол азимута прямой, образованной точками A_i' , A_{i+1}' [15,172]:

$$\varphi'_{AA} = 90 \cdot \left(\frac{y'_{i+1} - y'_i}{|y'_{i+1} - y'_i|} \right) \cdot \left(1 - \frac{x'_{i+1} - x'_i}{|x'_{i+1} - x'_i|} \right) + \arctan \left(\frac{x'_{i+1} - x'_i}{y'_{i+1} - y'_i} \right). \quad (4.2.6)$$

Для случаев а) и в) рисунка 4.2.4 координаты точек B_i и C_i вычисляются по формулам [15,172]:

$$x_B = \begin{cases} x'_i + R_{\min} \sin \varphi'_{AA}, & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ x'_i - R_{\min} \sin \varphi'_{AA}, & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases} \quad (4.2.7)$$

$$y_B = \begin{cases} y'_i + R_{\min} \cos \varphi'_{AA}, & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ y'_i - R_{\min} \cos \varphi'_{AA}, & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases} \quad (4.2.8)$$

$$x_C = \begin{cases} x'_{i+1} + R_{\min} \sin \varphi'_{AA}, & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ x'_{i+1} - R_{\min} \sin \varphi'_{AA}, & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases} \quad (4.2.9)$$

$$y_C = \begin{cases} y'_{i+1} + R_{\min} \cos \varphi'_{AA}, & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ y'_{i+1} - R_{\min} \cos \varphi'_{AA}, & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases} \quad (4.2.10)$$

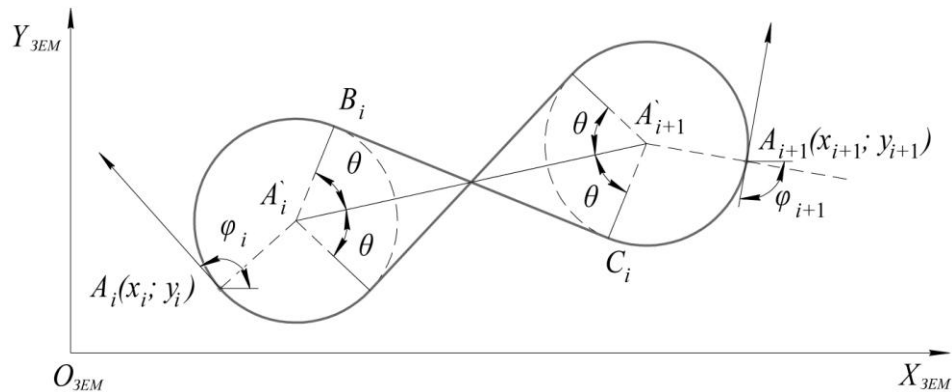


Рисунок 4.2.5 – Расчетная схема построения внутренних касательных

Для случаев б) и г) дополнительно вычисляется угол внутренней касательной θ (рисунок 4.2.5) [15,172]

$$\theta = \arccos \frac{2R_{\min}}{A'_i A'_{i+1}}, \quad (4.2.11)$$

где $A'_i A'_{i+1} = \frac{x'_{i+1} - x'_i}{\cos \varphi'_{AA}}$ – длина отрезка между точками A'_i и A'_{i+1} .

Для случаев б) и г) координаты точек B_i и C_i вычисляются по формулам [15]:

$$x_B = \begin{cases} x'_i + R_{\min} \cos(\varphi'_{AA} + \theta), & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ x'_i + R_{\min} \cos(\varphi'_{AA} - \theta), & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases} \quad (4.2.12)$$

$$y_B = \begin{cases} y'_i + R_{\min} \sin(\varphi'_{AA} + \theta), & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ y'_i + R_{\min} \sin(\varphi'_{AA} - \theta), & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases} \quad (4.2.13)$$

$$x_C = \begin{cases} x'_{i+1} - R_{\min} \cos(\varphi'_{AA} - \theta), & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ x'_{i+1} - R_{\min} \cos(\varphi'_{AA} + \theta), & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases} \quad (4.2.14)$$

$$y_C = \begin{cases} y'_{i+1} - R_{\min} \sin(\varphi'_{AA} - \theta), & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ y'_{i+1} - R_{\min} \sin(\varphi'_{AA} + \theta), & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases} \quad (4.2.15)$$

Первая часть траектории – поворот с центром в точке A'_i от угла [15,172]

$$\varphi'_i = \begin{cases} \varphi_i + 90, & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ \varphi_i - 90, & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases} \quad (4.2.16)$$

до угла

$$\varphi''_i = \begin{cases} \varphi_{BC} + 90, & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ \varphi_{BC} - 90, & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases} \quad (4.2.17)$$

где φ_{BC} – угол отрезка, образованного точками B_i и C_i

$$\varphi_{BC} = 90 \cdot \left(\frac{y_C - y_B}{|y_C - y_B|} \right) \cdot \left(1 - \frac{x_C - x_B}{|x_C - x_B|} \right) + \arctan \left(\frac{x_C - x_B}{y_C - y_B} \right). \quad (4.2.18)$$

Дуга начинается в точке A_i и заканчивается в точке B_i .

Координаты точек траектории вычисляются по формулам [15,172]

$$x_{1j} = R_{\min} \cos \varphi_j + x'_i; \quad (4.2.19)$$

$$y_{1j} = R_{\min} \sin \varphi_j + y'_i. \quad (4.2.20)$$

где $\varphi'_i \geq \varphi_j \geq \varphi''_i$ при повороте направо и $\varphi'_i \leq \varphi_j \leq \varphi''_i$ при повороте налево.

Вторая часть траектории – прямая линия от точки B_i до точки C_i [15,172]

$$y_{2j} = k \cdot x_{2j} + b. \quad (4.2.21)$$

Коэффициенты вычисляются по формулам [15,172]

$$k = \frac{y_C - y_B}{x_C - x_B}; \quad (4.2.22)$$

$$b = \frac{x_C \cdot y_B - y_C \cdot x_B}{x_C - x_B}. \quad (4.2.23)$$

Третья часть траектории – поворот с центром A_i' от угла [15,172]

$$\varphi'_{i+1} = \begin{cases} \varphi''_i, & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i \text{ и } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}, \text{ или } \varphi_{AA} < \varphi_i \text{ и } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}; \\ \varphi''_i + 180, & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_i \text{ и } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ \varphi''_i - 180, & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i \text{ и } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases} \quad (4.2.24)$$

до угла

$$\varphi''_{i+1} = \begin{cases} \varphi_{i+1} + 90, & \text{при } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ \varphi_{i+1} - 90, & \text{при } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases} \quad (4.2.25)$$

Дуга начинается в точке C_i и заканчивается в точке A_{i+1} .

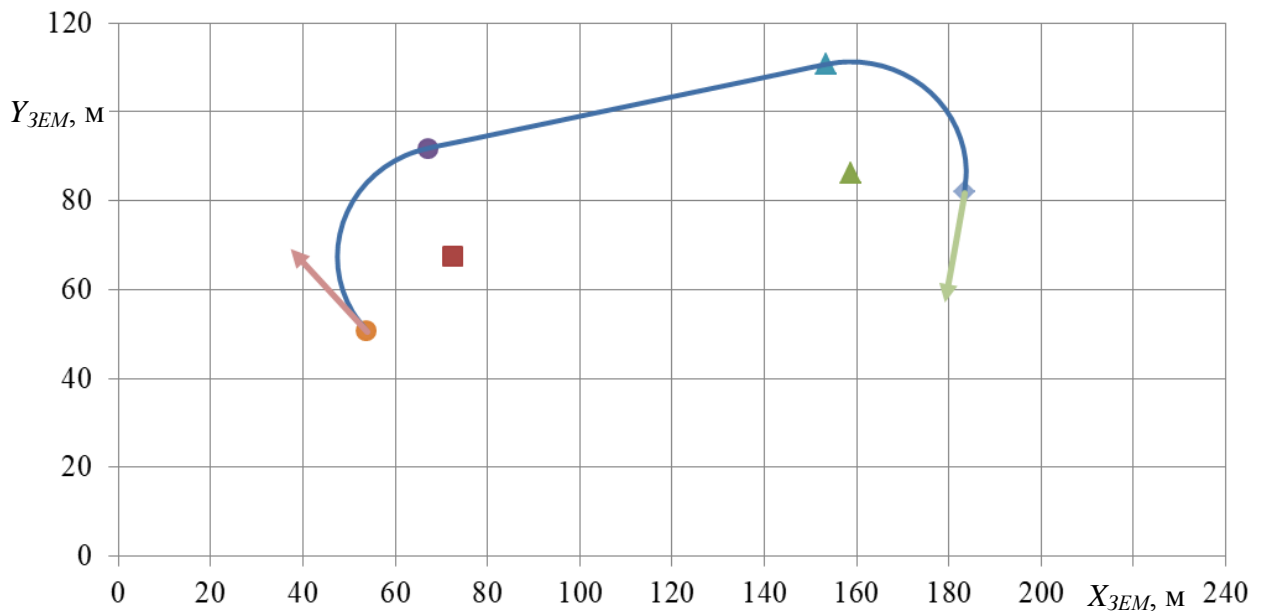


Рисунок 4.2.6 – Результат работы алгоритма построения траектории

Координаты точек траектории вычисляются по формулам

$$x_{3j} = R_{\min} \cos \varphi_j + x'_{i+1}; \quad (4.2.26)$$

$$y_{3j} = R_{\min} \sin \varphi_j + y'_{i+1}. \quad (4.2.27)$$

где $\varphi'_{i+1} \geq \varphi_j \geq \varphi''_{i+1}$ при повороте направо и $\varphi'_{i+1} \leq \varphi_j \leq \varphi''_{i+1}$ при повороте налево.

Таким образом, в результате выполнения описанного метода вычисляются координаты массива точек, составляющих траекторию движения от точки A_i до точки A_{i+1} . Траектория состоит из трех участков элементарного движения: поворот, движение по прямой, поворот. На рисунке 4.2.6 приведен пример результата работы метода [15,172].

Метод не будет работать в случаях б) и г), если окружности поворотов пересекаются, т.е. длина отрезка $A_i A_{i+1}$ меньше $4R_{\min}$.

4.3. Вектор состояния машины

Для функционирования СУ необходим достаточный объем информации. До начала работы должна быть определена оптимальная траектория машины – это возможно рассчитать исходя из двух задатчиков: цифрового макета местности (результат геодезической съемки) и цифрового проекта сооружения. Также необходима информация об используемой машине и ее ТТХ (например, для автогрейдера – максимальная толщина срезаемой стружки, ширина отвала и др.).

После завершения предварительных вычислений машина начинает движение по заданной траектории и выполнение рабочих операций. В процессе работы необходимо решать задачи позиционирования в пространстве с заданной точностью и четкого следования траектории.

Основой управления является информация. Соответственно, для решения задачи позиционирования необходимо в каждый момент времени определять вектор состояния машины \bar{R} в пространстве.

Вектор состояния ДСМ – это вектор координат ДСМ и ее частей, необходимый и достаточный для реализации алгоритмов и методов автономного управления ДСМ (таблица 4.1).

Элементами вектора являются 6 координат ДСМ: 3 координаты точки начала

и три угловых координаты направления. Помимо этого необходимо знать взаимное расположение подвижных частей ДСМ: угол поворота передних колес, угол складывания полурам, пространственное положение РО (вертикальную координату, угол поперечного уклона и угол захвата) и скорость машины:

$$\bar{R} = [x_1, y_1, z_1, \gamma_1, \vartheta_1, \varphi_1, \varphi_K, \varphi_P, z_{PO}, \varphi_{PO}, \gamma_{PO}, V]. \quad (4.3.1)$$

Таблица 4.1

Переменные, входящие в вектор состояния машины

Перемен.	Значение	Датчик первичной информации	
x_1	перемещение машины (точки O_0) вдоль оси $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}$	Приемник ГНСС	
y_1	перемещение машины (точки O_0) вдоль оси $O_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}$		
z_1	перемещение машины (точки O_0) вдоль оси $O_{ЗЕМ}Z_{ЗЕМ}$		
V	скорость машины		
γ_1	поворот подмоторной рамы машины вокруг оси O_0X_0	3-осный акселерометр-гирископ	
ϑ_1	поворот подмоторной рамы машины вокруг оси O_0Y_0		
φ_1	поворот подмоторной рамы машины вокруг оси O_0Z_0		
φ_K	поворот передних колес вокруг оси O_7Z_7	Датчик угла поворота	
φ_P	складывание полурам машины	Датчик угла поворота	
z_{PO}	вертикальная координата центральной точки кромки РО в системе координат $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}Z_{ЗЕМ}$	Приемник ГНСС + 3-осный акселерометр-гирископ	2 приемника ГНСС по краям РО
γ_{PO}	угол поперечного уклона РО в системе координат $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}Z_{ЗЕМ}$		
φ_{PO}	угол захвата РО	Датчик угла поворота	

Варианты технической реализации системы:

1) приемник ГНСС на базовой машине, 3-осный акселерометр-гирископ на базовой машине, датчик угла поворота передних колес, датчик угла складывания полурам, 2 приемника ГНСС по краям РО, датчик угла захвата РО;

2) приемник ГНСС на базовой машине, 3-осный акселерометр-гирископ на базовой машине, датчик угла поворота передних колес, датчик угла складывания полурам, приемника ГНСС на РО, 3-осный акселерометр-гирископ на РО, датчик угла захвата РО.

Для определения координат ДСМ или ее РО с использованием сигналов спутников ГНСС целесообразно использовать алгоритм, который заключается в следующем [119,171].

Имеется неподвижная правая ортогональная система координат $O_{ЗЕМ} X_{ЗЕМ} Y_{ЗЕМ} Z_{ЗЕМ}$ связанная с Землей и находящаяся на ее поверхности. Ось $O_{ЗЕМ} Z_{ЗЕМ}$ данной системы направлена вертикально вверх, оси $O_{ЗЕМ} X_{ЗЕМ}$ и $O_{ЗЕМ} Y_{ЗЕМ}$ расположены на плоскости и образуют правую ортогональную систему координат. Также на поверхности Земли имеется принадлежащая дорожной или строительной машине точка O_0 , координаты которой в системе $O_{ЗЕМ} X_{ЗЕМ} Y_{ЗЕМ} Z_{ЗЕМ}$ необходимо найти. На геостационарных орбитах над поверхностью Земли находятся три искусственных спутника, чьи координаты в системе $O_{ЗЕМ} X_{ЗЕМ} Y_{ЗЕМ} Z_{ЗЕМ}$ в любой момент времени известны: $[x_{01}; y_{01}; z_{01}]$ для спутника № 1, $[x_{02}; y_{02}; z_{02}]$ для спутника № 2 и $[x_{03}; y_{03}; z_{03}]$ для спутника № 3 [119,171].

Также известны три расстояния от трех спутников (спутники № 1, 2 и 3) до точки O_0 : l_1, l_2, l_3 соответственно (рисунок 4.3.1), измеренные при помощи приемника ГНСС, находящегося в точке O_0 [119,171].

Необходимо определить координаты точки $O_0 [x_{0T}; y_{0T}; z_{0T}]$ в неподвижной системе координат $O_{ЗЕМ} X_{ЗЕМ} Y_{ЗЕМ} Z_{ЗЕМ}$, связанной с Землей [119,171].

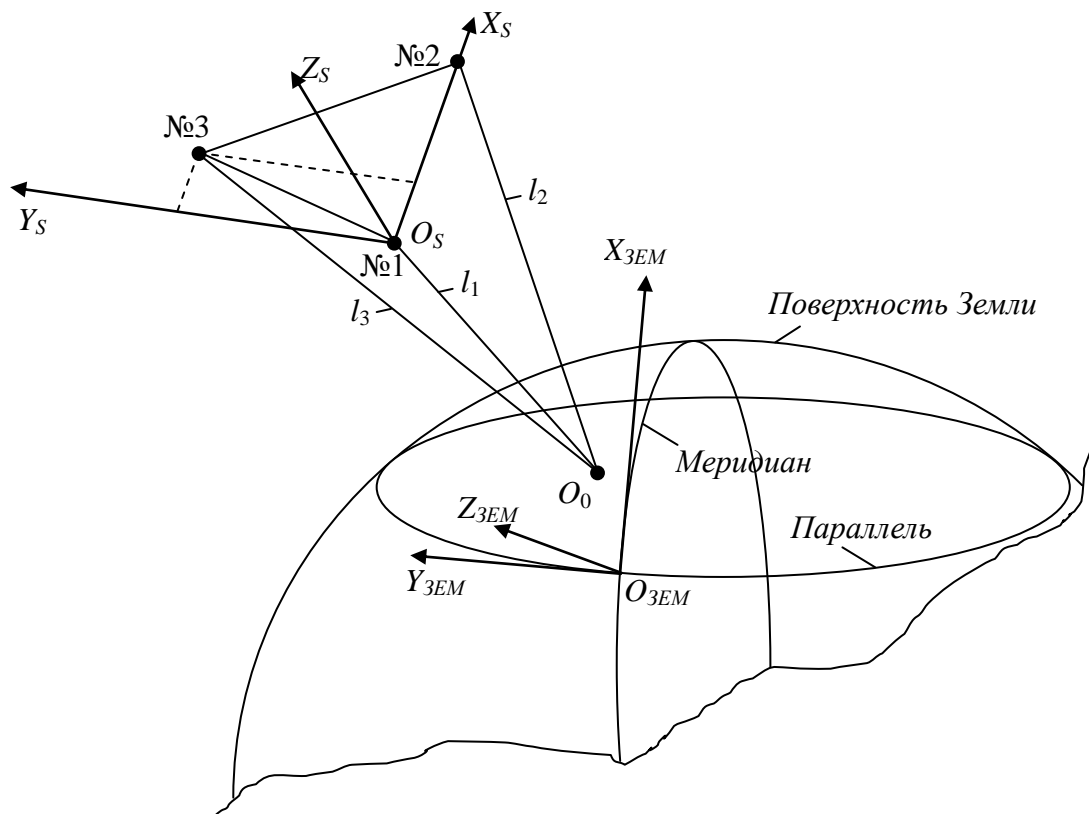


Рисунок 4.3.1 – Точка O_0 (ДСМ), три точки спутников и системы координат $O_{ЗЕМ} X_{ЗЕМ} Y_{ЗЕМ} Z_{ЗЕМ}$ и $O_S X_S Y_S Z_S$

Замена исходной постановки задачи на упрощенную

Использование прямого решения исходной задачи затруднено громоздкостью решений системы из трех уравнений сфер в декартовых координатах [119,171].

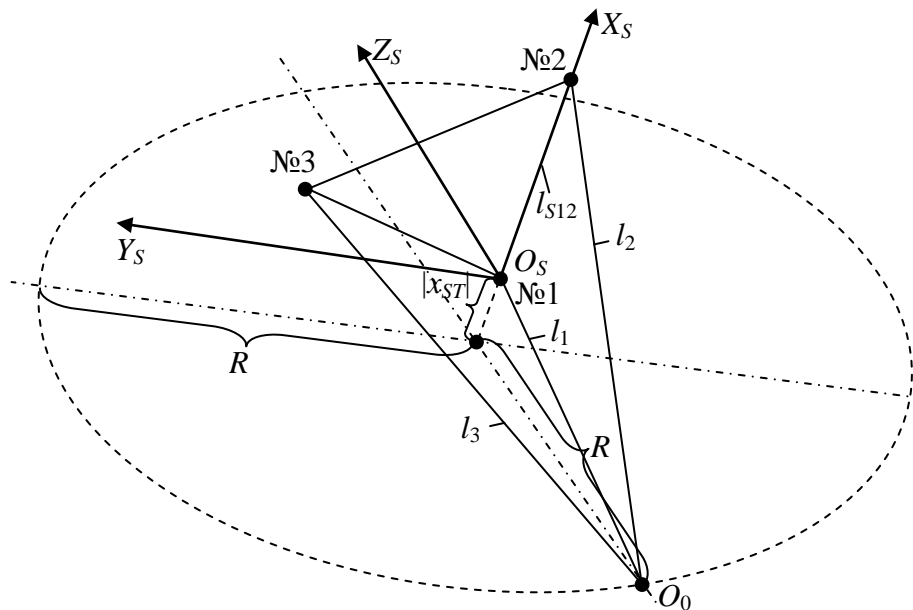


Рисунок 4.3.2 – Схема упрощенной задачи с дополнительными ограничениями

Для упрощения решения исходной задачи была использована упрощенная при помощи дополнительных ограничений постановка задачи поиска решения в локальной системе координат $O_S X_S Y_S Z_S$, связанной с точками текущего положения спутников № 1, 2 и 3 [119,171].

Оси системы $O_S X_S Y_S Z_S$ для упрощения выводимых зависимостей располагались следующим образом: ось $O_S X_S$ соединяет точки расположения спутников № 1 и № 2, причем точка начала координат O_S совпадает с точкой спутника № 1. Точка спутника № 3 располагалась в плоскости $O_S X_S Y_S$ (рисунок 4.3.2) [119,171].

Систему координат $O_S X_S Y_S Z_S$ можно расположить с соблюдением описанных ограничений при любых численных значениях координат трех спутников, т.е. для любой формы треугольника, образованного точками спутников [119,171].

При описанном расположении точек трех спутников в системе $O_S X_S Y_S Z_S$, необходимо найти координаты точки ДСМ $O_0 [x_{ST}; y_{ST}; z_{ST}]$ в системе $O_S X_S Y_S Z_S$ [119,171].

В качестве исходных данных упрощенной задачи с дополнительными ограничениями выступают: расстояния от трех спутников (спутники № 1, 2 и 3) до точки O_0 : l_1, l_2, l_3 соответственно и координаты трех спутников в системе $O_S X_S Y_S Z_S$: $[0; 0; 0]$ для спутника № 1, $[x_{S2}; 0; 0]$ для спутника № 2 и $[x_{S3}; y_{S3}; 0]$ для спутника № 3 [119,171].

Решение упрощенной задачи с дополнительными ограничениями

1. Определяется расстояние l_{S12} от точки спутника № 1 до точки спутника № 2.
2. С учетом принятых ограничений [119,171]

$$l_{S12} = x_{S2}. \quad (4.3.2)$$

2. Определяется значение полупериметра p треугольника, образованного точками двух спутников № 1, № 2, и точкой O_0 . Учитывая, что расстояния между точками №1– O_0 и №2– O_0 равны исходным данным l_1 и l_2 соответственно, p равен [119,171]

$$p = (l_1 + l_2 + l_{S12}) / 2. \quad (4.3.3)$$

3. Определяется высота R треугольника №1–№2– O_0 , опущенная из точки O_0 на сторону №1–№2 треугольника. Используется формула длины высоты через стороны треугольника [119,171]:

$$R = \frac{2}{l_{S12}} \sqrt{p \cdot (p - l_{S12}) \cdot (p - l_1) \cdot (p - l_2)}. \quad (4.3.4)$$

Высота R одновременно является радиусом окружности, лежащей в плоскости, параллельной $O_S Y_S Z_S$ с центром в точке, имеющей координаты $[x_{ST}; 0; 0]$ [119,171].

4. Определяется значение координаты x_{ST} точки O_0 с использованием теоремы Пифагора (sgn – функция знака числа) [119,171]:

$$x_{ST} = \text{sgn}(l_1 - l_2) \cdot \sqrt{l_1^2 - R^2}. \quad (4.3.5)$$

5. Формируется система двух уравнений координат точки O_0 , состоящая из уравнения окружности радиусом R с центром в точке с координатами $[x_{ST}; 0; 0]$ и уравнения известного расстояния l_3 между двумя точками O_0 и №3 [119,171]:

$$\begin{cases} y_{ST}^2 + z_{ST}^2 = R^2; \\ \sqrt{(x_{S3} - x_{ST})^2 + (y_{S3} - y_{ST})^2 + (-z_{ST})^2} = l_3. \end{cases} \quad (4.3.6)$$

Неизвестными в системе (4.3.6) являются две координаты точки O_0 y_{ST} и z_{ST} .

6. Единственное решение системы (4.3.6) по y_{ST} имеет вид [119,171]

$$y_{ST} = (x_{S3}^2 - 2 \cdot x_{S3} \cdot x_{ST} + x_{ST}^2 + y_{S3}^2 + R^2 - l_3^2) / (2 \cdot y_{S3}). \quad (4.3.7)$$

7. Учитывая громоздкость выражений двух решений системы (4.3.6) по z_{ST} , модуль значения z_{ST} проще вычисляется из уравнения окружности [119,171]

$$|z_{ST}| = \sqrt{R^2 - y_{ST}^2}. \quad (4.3.8)$$

В результате решения упрощенной задачи с дополнительными ограничениями, по (4.3.5), (4.3.7) и (4.3.8) формируются вектора двух точек решения с координатами $[x_{ST}; y_{ST}; +|z_{ST}|]$ и $[x_{ST}; y_{ST}; -|z_{ST}|]$ [119,171].

Решение исходной задачи

Для решения исходной задачи с использованием в качестве составного этапа решения упрощенной задачи, применен метод однородных координат [119,171]. Коэффициент масштабирования принят равным 1.

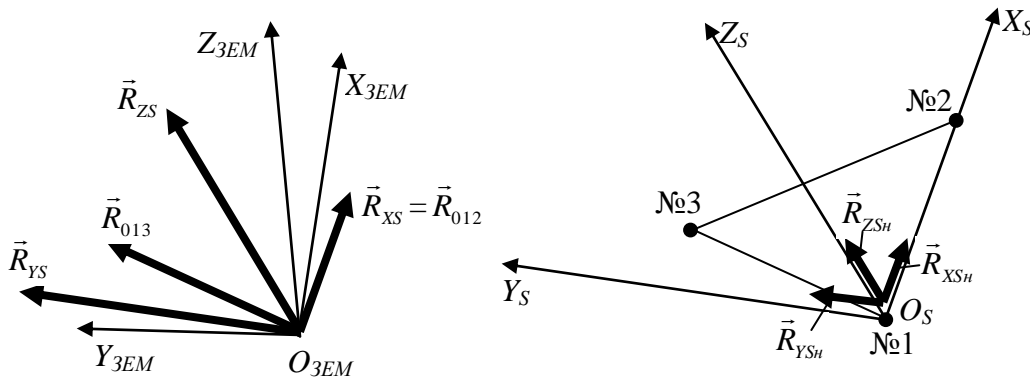


Рисунок 4.3.3 – Схема векторов, используемых для формирования матрицы перехода из системы координат $O_S X_S Y_S Z_S$ в систему координат $O_{ZEM} X_{ZEM} Y_{ZEM} Z_{ZEM}$

1. На основе координат исходных данных $[x_{01}; y_{01}; z_{01}]$ для спутника № 1, $[x_{02}; y_{02}; z_{02}]$ для спутника № 2 и $[x_{03}; y_{03}; z_{03}]$ для спутника № 3, в системе координат $O_{ZEM} X_{ZEM} Y_{ZEM} Z_{ZEM}$ формируются два ненормированных вектора (рисунок 4.3.3): направления от точки №1 к точке №2 [119,171]

$$\bar{R}_{012} = [x_{012}; y_{012}; z_{012}; 1]^T = [(x_{02} - x_{01}); (y_{02} - y_{01}); (z_{02} - z_{01}); 1]^T, \quad (4.3.9)$$

и направления от точки №1 к точке №3

$$\vec{R}_{013} = [x_{013}; y_{013}; z_{013}; 1]^T = [(x_{03} - x_{01}); (y_{03} - y_{01}); (z_{03} - z_{01}); 1]^T. \quad (4.3.10)$$

Вектор $\vec{R}_{XS} = [x_{XS}; y_{XS}; z_{XS}; 1]^T = \vec{R}_{012}$, в соответствии с принятыми ограничениями для упрощенной задачи, будет параллелен оси $O_S X_S$ локальной системы координат $O_S X_S Y_S Z_S$ [119,171].

2. Векторное произведение векторов \vec{R}_{012} и \vec{R}_{013} представляет собой вектор \vec{R}_{ZS} , перпендикулярный одновременно \vec{R}_{012} и \vec{R}_{013} и, следовательно, в соответствии с принятыми ограничениями для упрощенной задачи, параллельный оси $O_S Z_S$ локальной системы координат $O_S X_S Y_S Z_S$. Компоненты вектора \vec{R}_{ZS} согласно формулам векторного произведения в трехмерном пространстве равны [119,171]

$$\vec{R}_{ZS} = \vec{R}_{012} \times \vec{R}_{013} = [x_{ZS}; y_{ZS}; z_{ZS}; 1]^T = \begin{bmatrix} y_{012} \cdot z_{013} - z_{012} \cdot y_{013} \\ z_{012} \cdot x_{013} - x_{012} \cdot z_{013} \\ x_{012} \cdot y_{013} - y_{012} \cdot x_{013} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.3.11)$$

3. Векторное произведение векторов \vec{R}_{XS} и \vec{R}_{ZS} представляет собой вектор \vec{R}_{YS} , перпендикулярный одновременно \vec{R}_{XS} и \vec{R}_{ZS} и, следовательно, параллельный оси $O_S Y_S$ локальной системы координат $O_S X_S Y_S Z_S$. Компоненты вектора \vec{R}_{YS} согласно формулам векторного произведения для образования правой ортогональной системы координат равны [119,171]

$$\vec{R}_{YS} = \vec{R}_{XS} \times \vec{R}_{ZS} = [x_{YS}; y_{YS}; z_{YS}; 1]^T = \begin{bmatrix} z_{XS} \cdot y_{ZS} - y_{XS} \cdot z_{ZS} \\ x_{XS} \cdot z_{ZS} - z_{XS} \cdot x_{ZS} \\ y_{XS} \cdot x_{ZS} - x_{XS} \cdot y_{ZS} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.3.12)$$

В результате по (4.3.9), (4.3.11) и (4.3.12) в системе координат $O_{ZEM} X_{ZEM} Y_{ZEM} Z_{ZEM}$ формируются три ненормированных ортогональных вектора, \vec{R}_{XS} , \vec{R}_{YS} и \vec{R}_{ZS} , направления которых совпадают с направлениями осей $O_S X_S$, $O_S Y_S$ и $O_S Z_S$ соответственно системы координат $O_S X_S Y_S Z_S$ согласно принятым для упрощенной задачи ограничениям [119,171].

4. Для нормирования векторов \vec{R}_{XS} , \vec{R}_{YS} и \vec{R}_{ZS} , определяется модуль каждого из них [119,171]:

$$|\vec{R}_{XS}| = \sqrt{x_{XS}^2 + y_{XS}^2 + z_{XS}^2}; \quad (4.3.13)$$

$$|\vec{R}_{YS}| = \sqrt{x_{YS}^2 + y_{YS}^2 + z_{YS}^2}; \quad (4.3.14)$$

$$|\vec{R}_{ZS}| = \sqrt{x_{ZS}^2 + y_{ZS}^2 + z_{ZS}^2}. \quad (4.3.15)$$

5. Выполняется нормирование векторов \vec{R}_{XS} , \vec{R}_{YS} и \vec{R}_{ZS} , путем деления их компонентов на собственные модули [119,171]:

$$\vec{R}_{XS_H} = [x_{XS_H}; y_{XS_H}; z_{XS_H}; 1]^T = [x_{XS} / |\vec{R}_{XS}|; y_{XS} / |\vec{R}_{XS}|; z_{XS} / |\vec{R}_{XS}|; 1]^T; \quad (4.3.16)$$

$$\vec{R}_{YS_H} = [x_{YS_H}; y_{YS_H}; z_{YS_H}; 1]^T = [x_{YS} / |\vec{R}_{YS}|; y_{YS} / |\vec{R}_{YS}|; z_{YS} / |\vec{R}_{YS}|; 1]^T; \quad (4.3.17)$$

$$\vec{R}_{ZS_H} = [x_{ZS_H}; y_{ZS_H}; z_{ZS_H}; 1]^T = [x_{ZS} / |\vec{R}_{ZS}|; y_{ZS} / |\vec{R}_{ZS}|; z_{ZS} / |\vec{R}_{ZS}|; 1]^T. \quad (4.3.18)$$

6. Согласно правилам преобразования прямоугольных систем координат, координаты ортов \vec{R}_{XS_H} , \vec{R}_{YS_H} и \vec{R}_{ZS_H} осей прямоугольной системы координат $O_S X_S Y_S Z_S$, выраженные в прямоугольной системе $O_{3EM} X_{3EM} Y_{3EM} Z_{3EM}$ будут являться элементами матрицы направляющих косинусов, описывающих повороты системы координат $O_S X_S Y_S Z_S$ относительно $O_{3EM} X_{3EM} Y_{3EM} Z_{3EM}$ [119,171].

Тогда в однородных координатах матрица A_{S0} перехода из локальной системы координат $O_S X_S Y_S Z_S$ к системе координат $O_{3EM} X_{3EM} Y_{3EM} Z_{3EM}$ будет иметь вид [119,171]

$$A_{S0} = \left[\begin{array}{ccc|c} x_{XS_H} & x_{YS_H} & x_{ZS_H} & x_{01} \\ y_{XS_H} & y_{YS_H} & y_{ZS_H} & y_{01} \\ z_{XS_H} & z_{YS_H} & z_{ZS_H} & z_{01} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]. \quad (4.3.19)$$

7. Матрица A_{0S} перехода из системы координат $O_{3EM} X_{3EM} Y_{3EM} Z_{3EM}$ к локальной системе координат $O_S X_S Y_S Z_S$ будет являться матрицей, обратной к A_{S0} [119,171]:

$$A_{0S} = A_{S0}^{-1} = \frac{1}{|A_{S0}|} \cdot A_{S0}^T, \quad (4.3.20)$$

где $|A_{S0}|$ – определитель матрицы A_{S0} ; $A_{S0\theta}^T$ – транспонированная матрица алгебраических дополнений соответствующих элементов матрицы A_{S0} [119,171].

8. Вектора трех точек расположения спутников, заданные в неподвижной системе координат $O_{3EM} X_{3EM} Y_{3EM} Z_{3EM}$: $\vec{R}_{01} = [x_{01}; y_{01}; z_{01}; 1]^T$ для спутника №1, $\vec{R}_{02} = [x_{02}; y_{02}; z_{02}; 1]^T$ для спутника №2 и $\vec{R}_{03} = [x_{03}; y_{03}; z_{03}; 1]^T$ для спутника №3 (исходные данные исходной задачи) выражаются в системе координат $O_S X_S Y_S Z_S$:

$$\vec{R}_{S1} = [x_{S1}; y_{S1}; z_{S1}; 1]^T = A_{0S} \cdot \vec{R}_{01}; \quad (4.3.21)$$

$$\vec{R}_{S2} = [x_{S2}; y_{S2}; z_{S2}; 1]^T = A_{0S} \cdot \vec{R}_{02}; \quad (4.3.22)$$

$$\vec{R}_{S3} = [x_{S3}; y_{S3}; z_{S3}; 1]^T = A_{0S} \cdot \vec{R}_{03}. \quad (4.3.23)$$

Ненулевыми компонентами данных векторов будут при этом являться только x_{S2} , x_{S3} и y_{S3} , согласно дополнительным ограничениям упрощенной задачи [119,171].

9. Выполняется решение упрощенной задачи с дополнительными ограничениями по методике, изложенной выше. Формируются вектора двух точек решения с однородными координатами $\vec{R}_{ST1} = [x_{ST}; y_{ST}; +|z_{ST}|; 1]^T$ и $\vec{R}_{ST2} = [x_{ST}; y_{ST}; -|z_{ST}|; 1]^T$ [119,171].

10. Вектора \vec{R}_{ST1} и \vec{R}_{ST2} переводятся из локальной системы координат $O_S X_S Y_S Z_S$ в систему координат $O_{3EM} X_{3EM} Y_{3EM} Z_{3EM}$ [119,171]:

$$\vec{R}_{T1} = [x_{T1}; y_{T1}; z_{T1}; 1]^T = A_{S0} \cdot \vec{R}_{ST1}; \quad (4.3.24)$$

$$\vec{R}_{T2} = [x_{T2}; y_{T2}; z_{T2}; 1]^T = A_{S0} \cdot \vec{R}_{ST2}. \quad (4.3.25)$$

11. Выполняется проверка значений компонент высотной координаты точки O_0 z_{T1} и z_{T2} векторов \vec{R}_{T1} и \vec{R}_{T2} соответственно на превышение их абсолютными значениями порогового значения Δ по выполнению условий [119,171]:

$$|z_{T1}| \leq \Delta; \quad (4.3.26)$$

$$|z_{T2}| \leq \Delta. \quad (4.3.27)$$

Пороговое значение Δ высоты точки O_0 выбирается исходя из того соображения, что модуль значения высотной координаты точки O_0 будет очень мал по сравнению с высотой расположения спутников над поверхностью Земли. Одно

из двух решений при этом (неправильное решение) будет иметь значение высотной координаты сопоставимым, т.е. одного порядка с высотой расположения спутников над поверхностью Земли [119,171].

Из двух решений, полученных в п. 10, условия (4.3.26), (4.3.27) будут выполняться только для одного, которое и будет единственно верным решением поставленной исходной задачи [119,171].

4.4. Методы управления курсом движения дорожно-строительной машины

Основная задача подсистемы движения – следовать заданному пути, представленному массивом точек, соединенных отрезками линий. Для решения этой проблемы разработано множество различных методов, в основном для небольших двухколесных роботов или автомобилей [1-16,30,141,155,218]. Для низкоскоростных машин применимы более простые стратегии управления, в которых возможны допущения. Строительная площадка представляет собой достаточно однородную, с точки зрения грунтовых условий, поверхность [192].

Метод управления должен учитывать не только положение целевой точки траектории, но и гарантировать, что ДСМ достигнет ее с правильной ориентацией и углом поворота (в отношении ориентации и кривизны траектории в точке обзора) [192].

Задача навигации ДСМ может быть разделена на глобальную и локальную. Глобальная – это построение траектории до начала работы по данным 3D-проекта и цифровой карты местности. Локальная – это навигация в процессе движения и изменение траектории при возникновении непредвиденных препятствий [192].

Согласно блок-схеме рабочего процесса ДСМ с перспективной системой автономного управления (рисунок 4.1.3) УУ курсом является подсистемой с двумя входами и двумя выходами векторов параметров.

Вектор \bar{P}_6 является вектором состояния машины (в т.ч. его рабочего

оборудования). Вектор \bar{P}_{17} является заданной траекторией движения ДСМ в виде массива путевых точек или непрерывной траектории вида $Y = f(X)$. Вектор \bar{P}_{11} является управляющим сигналом на ГРУ, содержащим в себе сигналы φ_K и φ_P (в зависимости от конкретного типа рулевого управления ДСМ). Вектор \bar{P}_{12} является управляющим воздействием на силовую установку ДСМ и формирует скорость машины $V_{зад}$.

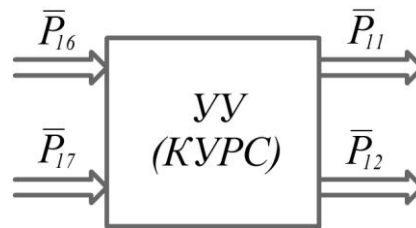


Рисунок 4.4.1 – Блок-схема устройства управления курсом

Как было рассмотрено ранее, траектория движения ДСМ представляет собой массив путевых точек, которые ДСМ должна проходить в строго определенном порядке. Помимо координат, путевая точка содержит в себе информацию о курсе, на который должен встать автогрейдер после достижения данной точки.

Постановка задачи: привести центр задней оси из точки $A_i(x_i, y_i)$ в точку $A_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$. В таком случае возможны несколько вариантов реализации метода управления.

4.4.1. Принципы управления курсом движения

Наиболее распространенным принципом управления является программное управление, при котором управляющее воздействие заранее рассчитывается и подается на вход в зависимости от времени или от другого параметра. Подобный принцип широко применяется в робототехнике и в управлении металлообрабатывающими станками с ЧПУ (рисунок 4.4.2) [197,240].

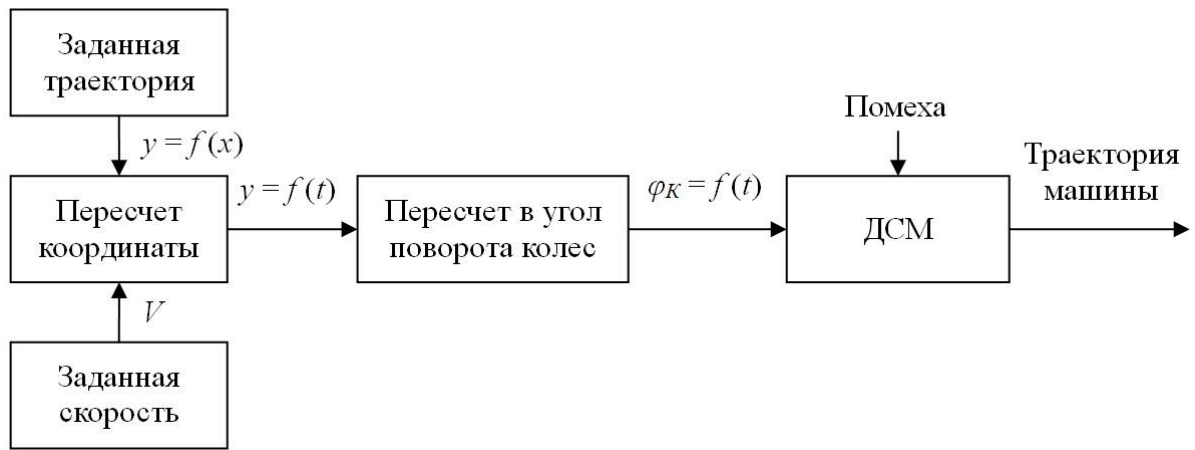


Рисунок 4.4.2 – Структурная схема системы программного управления движением [197]

Но при управлении ДСМ возникает еще одно входное воздействие на объект управления – помеха. Помеха – это совокупное влияние окружающей среды на контролируемые параметры ДСМ (координаты машины, координаты РО и др.). Например, при движении ДСМ по склону или при достаточно высоком значении силы сопротивления копанию на РО возникает такой эффект как юз колес, т.е. траектория движения изменяется. И подобное влияние накапливается с течением времени, т.к. в следующих моментах времени машина оказывается уже на других начальных условиях, а система управления продолжает выдавать управляющие воздействия без учета накапливающихся ошибок [197,240].

Одним из способов компенсации влияния помехи является использование принципа управления по отклонению, когда текущее значение физического параметра ДСМ сравнивается с заданным значением, например, текущие координаты машины сравниваются с координатами заданной траектории и результат сравнения – ошибка регулирования – подается на вход системы управления (СУ) и далее на гидравлическое рулевое управление (ГРУ). Подобные системы могут быть как одноконтурными (рисунок 4.4.3), так и многоконтурными (рисунок 4.4.4) [197,240].

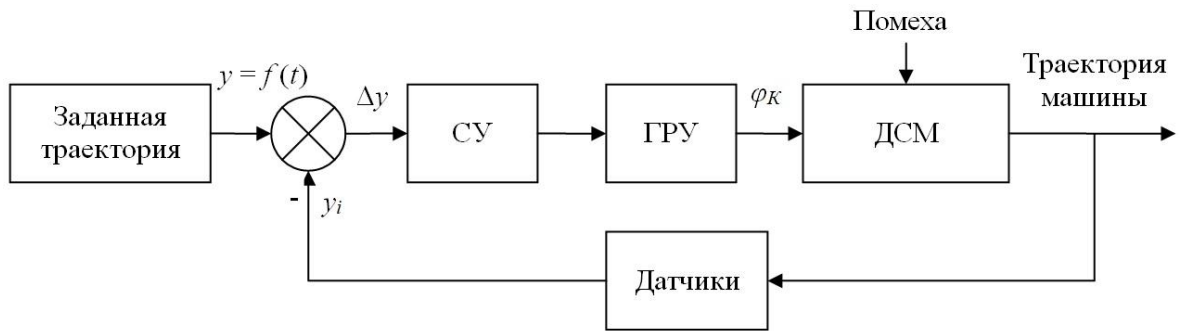


Рисунок 4.4.3 – Структурная схема системы управления движением по отклонению [197]

Применение данного принципа позволяет компенсировать влияние помехи, но при этом система приобретает такие нежелательные свойства как запаздывание, перерегулирование и колебательность. Снизить перерегулирование и колебательность процесса, согласно теории автоматического управления, можно применением различных законов регулирования, например, пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) закона. Основным недостатком этого принципа управления является то, что управляющее воздействие формируется уже после того, как появилась ошибка регулирования [197,240].

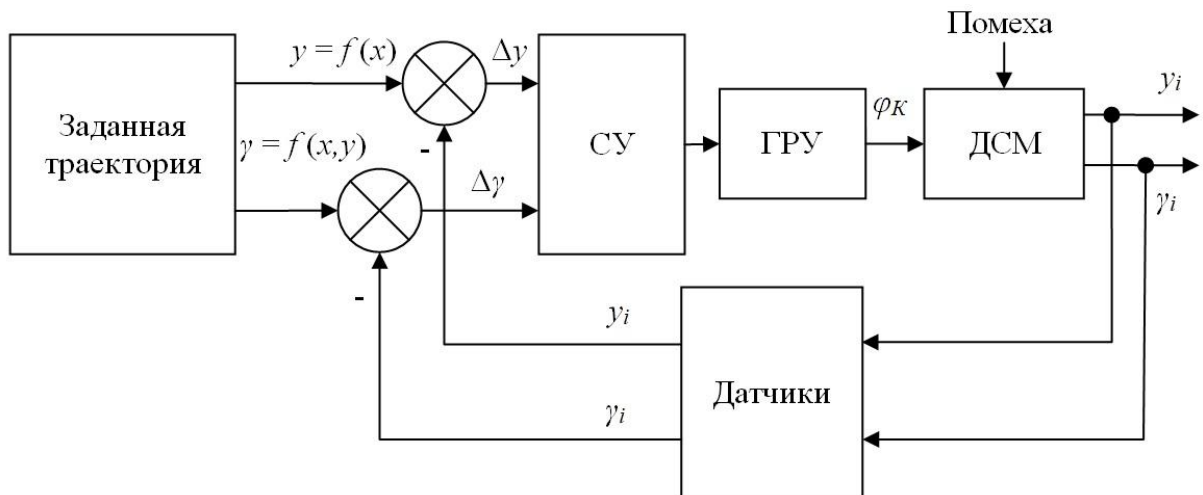


Рисунок 4.4.4 – Структурная схема двухконтурной системы управления движением по отклонению [197]

Система управления по возмущению (рисунок 4.4.5) обладает тем преимуществом, что управляющий сигнал формируется одновременно с появлением помехи. Это существенно снижает время запаздывания системы [197].

Однако данные системы не получили широкого распространения по двум причинам: технические трудности создания датчиков помехи и главное – компенсируется только основная помеха, в то время как остальные помехи отрицательно влияют на регулируемый параметр [197,240].

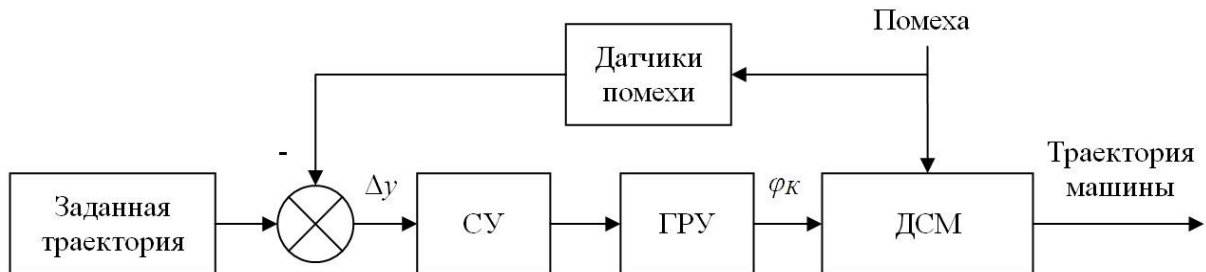


Рисунок 4.4.5 – Структурная схема системы управления движением по возмущению [197]

Применительно к ДСМ основной помехой является сила сопротивления копанию, которая приводит к отклонению ДСМ от заданной траектории.

Принцип комбинированного управления объединяет преимущества двух предшествующих принципов. Главная помеха компенсируется по принципу управления по возмущению, остальные помехи компенсируются по принципу управления по отклонению [197,240].

Применительно к ДСМ, где спектр помех достаточно низкочастотный, в настоящее время наибольшее распространение получили системы управления, построенные по принципу управления по отклонению.

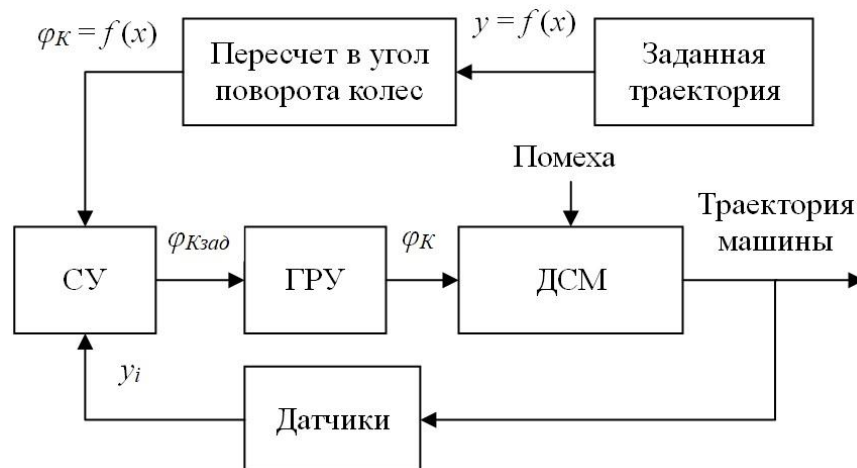


Рисунок 4.4.6 – Структурная схема системы комбинированного управления движением [197]

Для улучшения параметров системы управления предлагается использование комбинированного принципа управления, т.е. совмещения принципа управления по отклонению и программного принципа управления. Программный принцип управления в данном случае можно рассматривать как принцип управления по возмущению (рисунок 4.4.6) [197].

Для реализации программного принципа управления необходимо выполнять преобразование заданной траектории движения в функцию угла поворота колес. Поскольку существуют разные типы рулевого управления ДСМ, данная задача может быть решена на основе кинематической модели. В п. 3.7 были разработаны кинематические модели процесса поворота ДСМ с различными типами рулевого управления. Дальнейшие преобразования выполнены на модели с передними управляемыми колесами [197].

Для формирования закона управления выполним обратное преобразование по полученной математической модели кинематики поворота. Входными параметрами будут текущие координаты машины x_0 и y_0 , текущий угол азимута γ_0 .

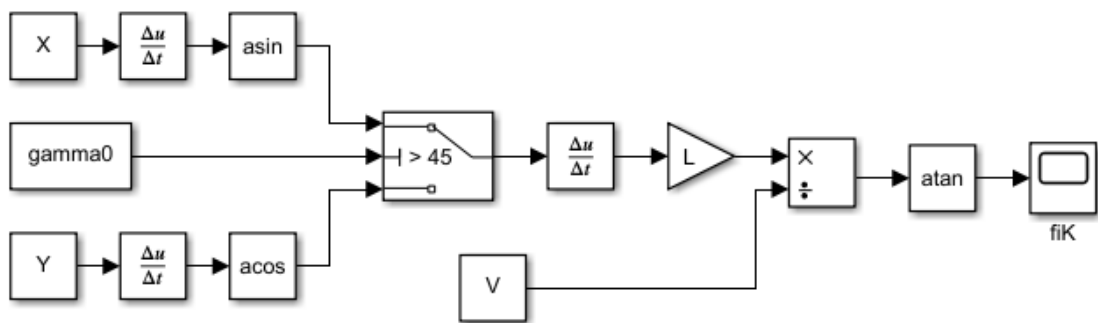


Рисунок 4.4.7 – Структурная схема системы управления дорожно-строительной машины с передними поворотными колесами в обозначениях MATLAB Simulink [197]

Возможны два варианта исполнения данного преобразования: обработка текущей траектории во время движения (рисунок 4.4.7) и преобразование заданной траектории в функцию угла поворота колес до начала движения (рисунок 4.4.8) [197].

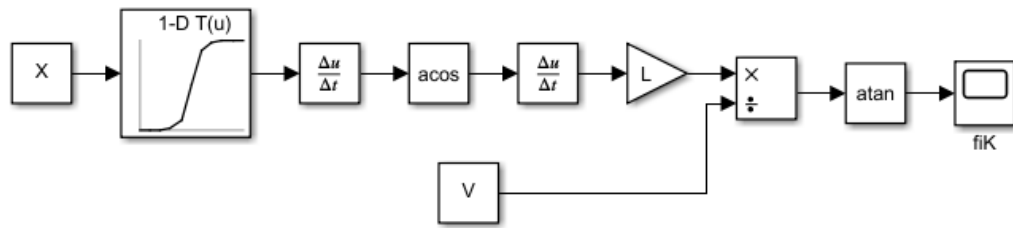


Рисунок 4.4.8 – Структурная схема преобразования заданной траектории движения в угол поворота передних колес в обозначениях MATLAB Simulink [197]

4.4.2. Управление по одной путевой точке

Данный метод широко применяется для управления движением судов и самолетов. Расчетная схема ДСМ представлена на рисунке 4.4.9 [192].

Информационными параметрами в данном случае являются: угол поворота передних колес φ_K , курсовой угол между продольной осью машины и направлением на опорную точку $\varphi_{A_{i+1}}$, курсовой угол φ_i , заданный курсовой угол $\varphi_{i,зад}$, расстояние до опорной точки S_i .

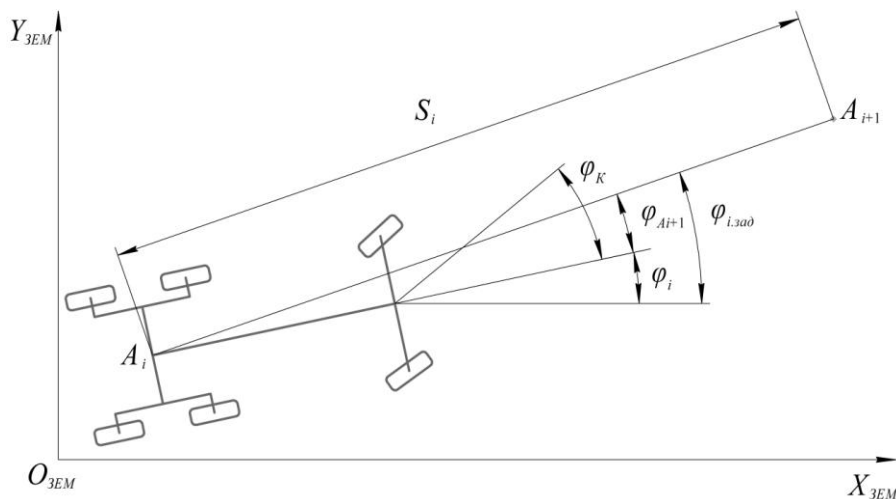


Рисунок 4.4.9 – Расчетная схема движения дорожно-строительной машины по одной путевой точке

Управляемым параметром является угол поворота передних колес φ_K .

Угол между продольной осью машины и направлением на путевую точку можно вычислить по формуле

$$\varphi_{Ai+1} = \varphi_{i.зад} - \varphi_i. \quad (4.4.1)$$

Целевая функция управления при таком методе будет иметь вид

$$\varphi_{Ai+1} \rightarrow 0. \quad (4.4.2)$$

Данный метод управления имеет существенный недостаток: при наличии бокового увода траектория машины будет отличаться от прямой линии, т.е. машина не будет возвращаться на прежнюю траекторию.

4.4.3. Управление по двум путевым точкам

В данном методе учитывается движение машины между двумя соседними путевыми точками. Такой метод применяется для управления движением колесных и гусеничных тракторов при работе на склоне [91]. Расчетная схема представлена на рисунке 4.4.10.

Информационными параметрами в данном случае являются: курсовой угол φ_i , заданный курсовой угол $\varphi_{i.зад}$, углы α , α_i , α_{i+1} , расстояние между точками S_{i+1} , углы между направлениями на следующую φ_{Ai+1} и предыдущую φ_{Ai} опорные точки.

Т.к. углы φ_i и $\varphi_{i.зад}$ являются абсолютными, т.е. отсчитываются от оси $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}$, то возможно определить расположение ДСМ относительно траектории. Если $\varphi_{Ai+1} > 0$, то траектория слева от ДСМ и поворачивать нужно налево.

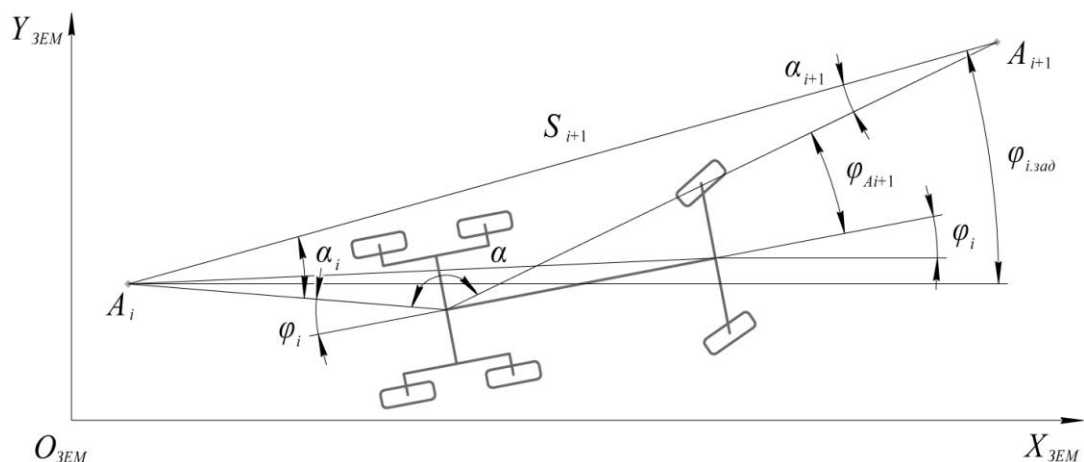


Рисунок 4.4.10 – Расчетная схема движения дорожно-строительной машины по двум путевым точкам

Целевая функция управления при таком методе будет иметь вид

$$\alpha \rightarrow 180^0. \quad (4.4.3)$$

4.4.4. Управление по непрерывной траектории

Данный метод управления предполагает аналитическое задание фиксированной траектории на местности в формате $Y = f(X)$.

Существует несколько методов управления ДСМ по непрерывной траектории: «чистое преследование», метод Стэнли и предложенный в данной работе копирный метод.

Метод «чистое преследование» (Pure Pursuit)

Метод «чистое преследование» и его разновидности являются одними из наиболее распространенных подходов к проблеме управления курсом движения мобильных роботов. Метод чистого преследования состоит из геометрического расчета радиуса дуги окружности, которая соединяет местоположение задней оси с целевой точкой на траектории впереди ДСМ. Целевая точка определяется исходя из дальности видимости L_0 от центральной точки задней оси до траектории [1-13,16,192,196].

Угол поворота ДСМ может быть определен с использованием только местоположения целевой точки и угла φ между вектором курса машины и вектором прогнозирования. Из рисунка 4.4.11 можно записать [1-13,16,192,196]

$$\frac{L_0}{\sin 2\varphi} = \frac{R}{\sin(90 - \varphi)}; \quad (4.4.4)$$

$$R = \frac{L_0}{2 \sin \varphi} = \frac{L_0^2}{2\Delta Y_1}. \quad (4.4.5)$$

Необходимый угол поворота ДСМ можно вычислить, используя соответствующие уравнения для конкретного типа ДСМ. Например, для ДСМ с передними поворотными колесами

$$\frac{L_0^2}{2\Delta Y_1} = \frac{L}{\operatorname{tg}\varphi_K}. \quad (4.4.6)$$

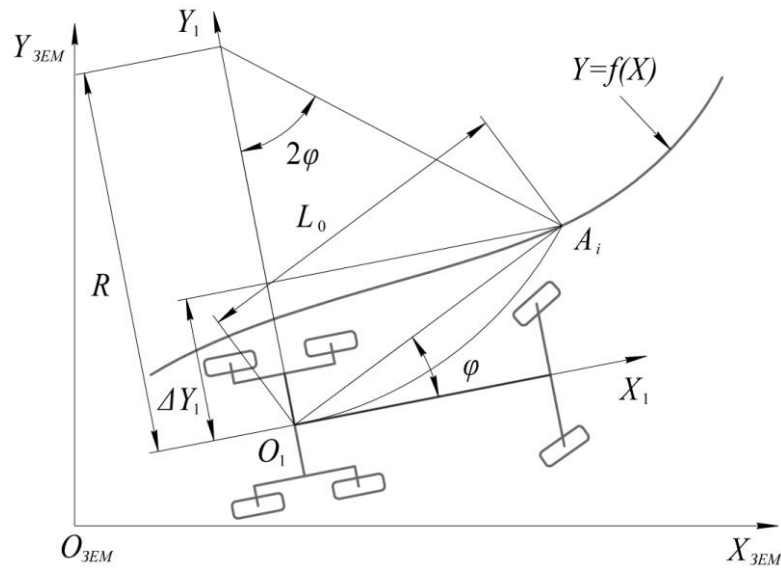


Рисунок 4.4.11 – Расчетная схема метода «чистое преследование» [2,3,5,6,8,10-13,192,196]

Угол поворота колес будет равен

$$\varphi_K = \arctan\left(\frac{2\Delta Y_1 L}{L_0^2}\right) = \arctan(K_{PP}\Delta Y_1). \quad (4.4.7)$$

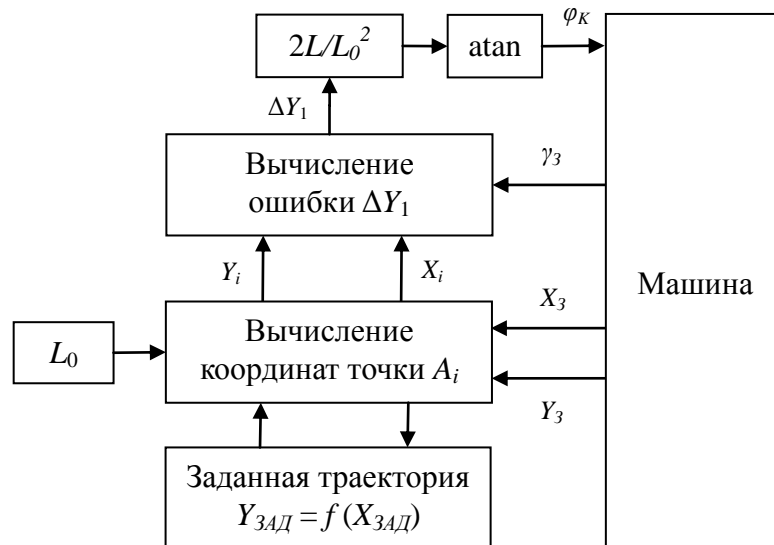


Рисунок 4.4.12 – Структурная схема метода «чистое преследование»

Таким образом, метод «чистое преследование» является пропорциональным регулятором по ошибке поперечного смещения ДСМ. Параметром настройки регулятора будет коэффициент K_{PP} . Структурная схема метода «чистое преследование» представлена на рисунке 4.4.12.

Метод Стэнли

Метод Стэнли – это метод отслеживания пути, использованный в автомобиле Стэнли (Stanley) Стэнфордского университета на соревновании автономных транспортных средств DARPA Grand Challenge. Метод Стэнли представляет собой нелинейную функцию обратной связи поперечной ошибки ΔY_3 , измеренной от центра передней оси до ближайшей точки пути $A_i(x_i, y_i)$, для которой может быть показана экспоненциальная сходимость. На рисунке 4.4.13 показана расчетная схема метода. Взаимное расположение точки управления с управляемыми передними колесами позволяет получить интуитивно понятный закон управления, где первый член просто удерживает колеса выровненными по заданной траектории, устанавливая курсовой угол φ_K равным углу касательной $\varphi_{K.зад}$ к траектории в точке $A_i(x_i, y_i)$ [5,6,8,9,12,14,189,192].

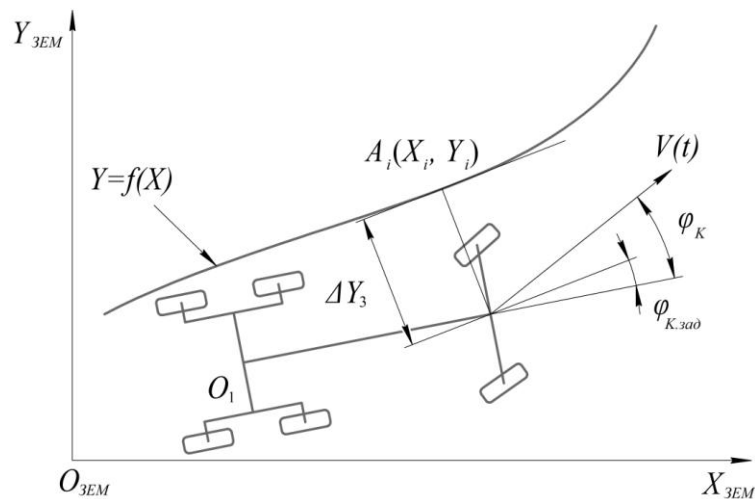


Рисунок 4.4.13 – Расчетная схема метода Стэнли [5,6,8,12,14,189,192]

Когда ΔY_3 не равно нулю, второй член регулирует φ_K таким образом, чтобы предполагаемая траектория пересекала касательную к заданной траектории. Закон

рулевого управления при данном методе имеет вид [5,6,8,12,14,189,192]

$$\varphi_K(t) = \varphi_{K.зад} + \arctan\left(\frac{k \cdot \Delta Y_3(t)}{V(t)}\right), \quad (4.4.8)$$

где k – коэффициент усиления.

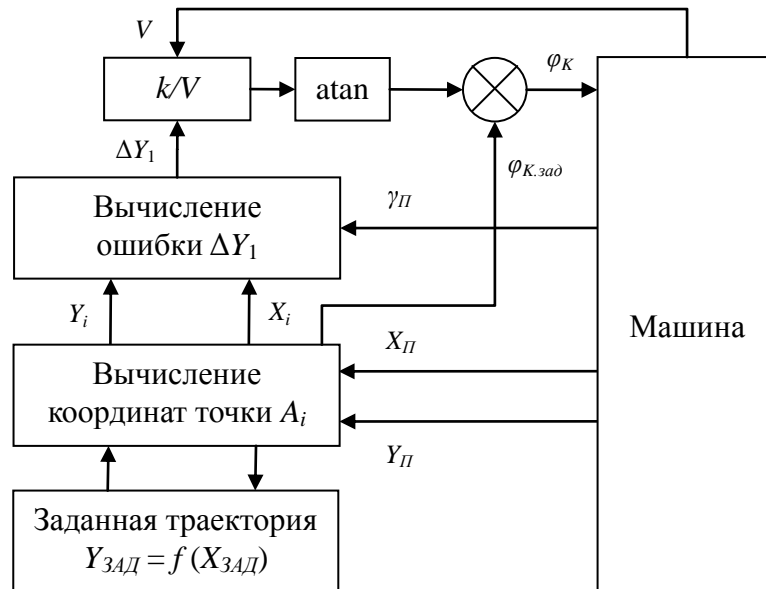


Рисунок 4.4.14 – Структурная схема метода Стэнли

По мере увеличения ΔY_3 колеса все больше будут поворачиваться в сторону заданной траектории. Структурная схема метода Стэнли представлена на рисунке 4.4.14.

Копирный метод управления

Точка копирования – это воображаемая точка на продольной оси машины, которую УУ курсом стремится совместить с заданной траекторией. В качестве точки копирования можно использовать центр масс машины, центр переднего или заднего моста или центр РО. Можно использовать точку, находящуюся вне машины, например, на удалении перед машиной.

Задача управления сводится к совмещению положения точки копирования машины и заданной траектории. Информационным параметром в данном методе является линейное отклонение точки копирования машины ΔY . Расчетная схема этого метода представлена на рисунке 4.4.15.

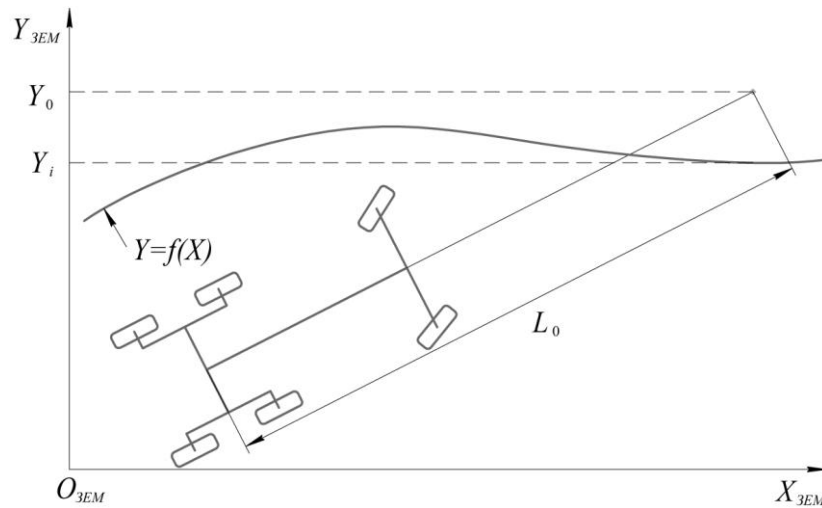


Рисунок 4.4.15 – Расчетная схема копирного метода управления

Метод управления основан на измерении отклонения копирной точки от заданной траектории

$$\Delta Y = Y_0 - Y_i. \quad (4.4.9)$$

Целевая функция управления данного метода будет иметь вид

$$\Delta Y \rightarrow 0. \quad (4.4.10)$$

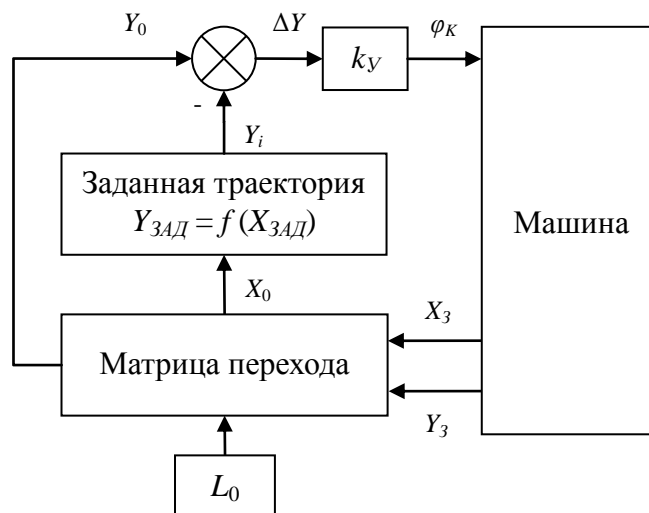


Рисунок 4.4.16 – Структурная схема копирного метода

Структурная схема копирного метода представлена на рисунке 4.4.16. Основными параметрами данного метода являются вынос точки копирования L_0 и коэффициент усиления k_Y (рис. 4.4.16)

4.5. Подсистема управления рабочим органом

Согласно 3D-проекта возводимого сооружения в каждой точке рабочей области необходимо обеспечить определенную высотную координату Z_{PO} и определенный угол уклона γ_{PO} РО.

Управление положением РО относительно базовой машины производится с помощью двух гидроцилиндров и поворотного круга, изменяющего угол захвата РО.

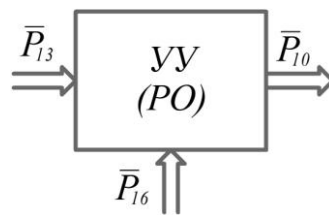


Рисунок 4.5.1 – Блок-схема устройства управления рабочим органом

Таким образом, необходимо разработать алгоритм управления, где входными параметрами будут: 1) заданная высотная отметка и заданный угол поперечного уклона (формируются исходя из данных 3D-проекта – вектор \bar{P}_{13} и данных о местоположении – вектор \bar{P}_{16}); 3) угол захвата РО (меняется системой управления загрузки ДВС, либо оператором, вектор \bar{P}_{16}). А выходными параметрами будут выдвигения штоков правого и левого гидроцилиндров (вектор \bar{P}_{10}).

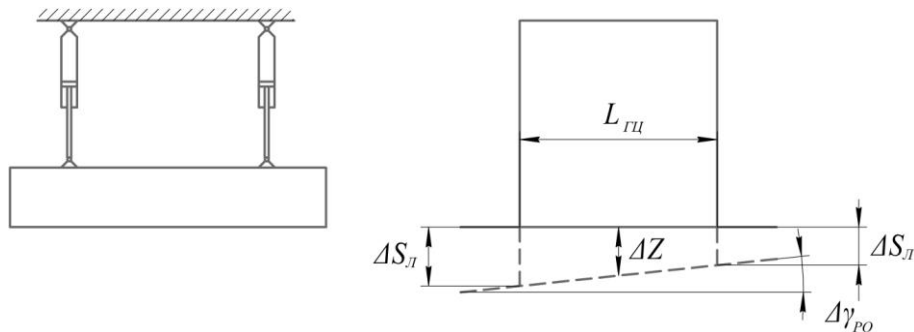


Рисунок 4.5.2 – Расчетная схема положения рабочего органа

Заданная высотная отметка и заданный угол поперечного уклона в каждый момент времени сравниваются с текущим положением РО, контролируемым СУ.

На выходе элементов сравнения будут сигналы ΔZ и $\Delta\gamma$, т.е. приращение вертикальной координаты и приращение угла поперечного уклона, на которые необходимо переместить РО. На расчетной схеме (рисунок 4.5.2) показана геометрическая связь между перемещением штоков гидроцилиндров и изменением положения РО [229].

$$\text{Из рисунка 4.5.2 можно записать } \Delta S_{\Pi} = \Delta Z + \frac{L_{ГЦ}}{2} \text{tg}\Delta\gamma_{РО}; \quad (4.5.1)$$

$$\Delta S_{\Pi} = \Delta Z - \frac{L_{ГЦ}}{2} \text{tg}\Delta\gamma_{РО}. \quad (4.5.2)$$

При этом необходимо учитывать влияние угла захвата РО на фактический угол поперечного уклона формируемого земляного полотна. Данный фактор подробно описан в работе [229]. Расчетная схема влияния угла захвата представлена на рисунке 4.5.3.

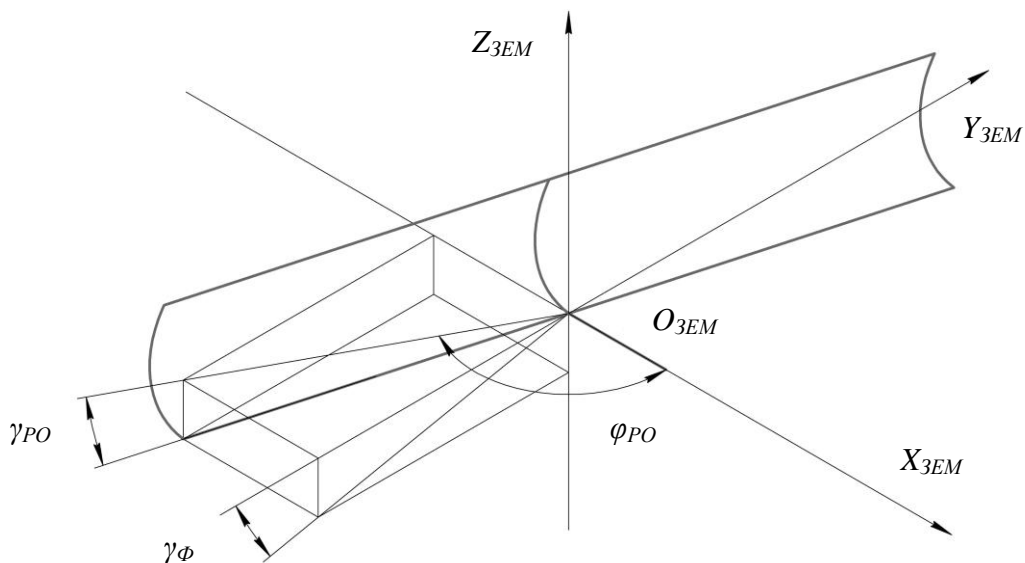


Рисунок 4.5.3 – Расчетная схема влияния угла захвата

Из рисунка 4.5.3 можно записать [229]

$$\text{tg}\gamma_{\Phi} = \frac{\text{tg}\gamma_{РО}}{\sin\varphi_{РО}}. \quad (4.5.3)$$

Таким образом, подставив уравнение (4.5.3) в уравнения (4.5.1) и (4.5.2), получаем

$$\Delta S_{II} = \Delta Z + \frac{L_{ГЦ}}{2} \operatorname{tg} \frac{\operatorname{tg} \Delta \gamma_{PO}}{\sin \varphi_{PO}}; \quad (4.5.4)$$

$$\Delta S_{II} = \Delta Z - \frac{L_{ГЦ}}{2} \operatorname{tg} \frac{\operatorname{tg} \Delta \gamma_{PO}}{\sin \varphi_{PO}}. \quad (4.5.5)$$

Эти сигналы будут подаваться через усилители и пороговые элементы на управляющие обмотки электрогидрораспределителей.

Пороговый элемент (рисунок 4.5.4) является электронным реле с регулируемой зоной нечувствительности. Пороговый элемент и его математическая модель детально изучены и описаны в предыдущих работах [232].

Так как быстродействие электронных схем на порядок выше по сравнению с другими элементами СУ, то пороговый элемент, с динамической точки зрения, можно описать как безинерционное реле.

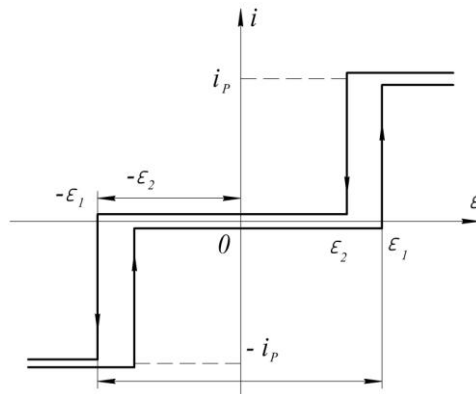


Рисунок 4.5.4 – Статическая характеристика порогового элемента

Математическое описание статической характеристики порогового элемента с гистерезисом можно представить в виде системы неравенств [232]:

$$i = \begin{cases} 0,5(i_p \cdot \operatorname{sgn}(\varepsilon + \varepsilon_1) + i_p \cdot \operatorname{sgn}(\varepsilon - \varepsilon_2)) & \text{при } \dot{\varepsilon} > 0; \\ 0,5(i_p \cdot \operatorname{sgn}(\varepsilon - \varepsilon_1) + i_p \cdot \operatorname{sgn}(\varepsilon + \varepsilon_2)) & \text{при } \dot{\varepsilon} < 0, \end{cases} \quad (4.5.6)$$

где ε — входная координата порогового элемента; i — выходная координата порогового элемента; ε_1 — значение входного сигнала, при достижении которого на выходе порогового элемента возникает выходной сигнал; ε_2 — значение входного сигнала, при достижении которого на выходе порогового элемента пропадает выходной сигнал.

4.6. Выводы по четвертой главе

1. Проведенный анализ рабочего процесса ДСМ позволил разработать блок-схемы рабочих процессов ДСМ без систем автоматизации, машины с серийной СУ и с перспективной системой автономного управления, которая управляет не только РО, но и движением ДСМ.

2. Разработан метод построения траектории движения, учитывающий кинематические ограничения колесных дорожно-строительных машин, координаты путевых точек и азимуты направления дальнейшего движения. На основе метода создана программа для ЭВМ «Модуль построения траектории движения дорожно-строительной машины», зарегистрированная в установленном порядке.

3. Предложено новое понятие: «вектор состояния дорожно-строительной машины» – это вектор параметров, описывающих текущее положение ДСМ и РО, необходимых и достаточных для реализации методов автономного управления ДСМ. Обоснованы варианты комплектов источников первичной измерительной информации для формирования «вектора состояния».

4. На основе анализа известных методов управления курсом движения машины и особенностей их применения к ДСМ предложен новый копирный метод управления курсом движения ДСМ.

5. Предложенный алгоритм работы подсистемы управления РО ДСМ учитывает продольное и поперечное перемещение РО, а также угол захвата РО.

ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Теоретические исследования математических моделей процесса поворота дорожно-строительной машины

Дорожно-строительная машина с передними поворотными колесами

Радиусы поворота ДСМ с передними поворотными колесами определены формулами (3.7.4) и (3.7.5) [191].

Необходимо отметить, что радиусы поворота ДСМ не зависят от скорости движения машины V и пропорциональны длине базы L . С увеличением φ_K радиусы поворота уменьшаются [191].

Из формулы (3.7.6) можно сделать вывод, что угловая скорость поворота рамы ДСМ прямо пропорциональна скорости машины, тангенсу угла поворота передних колес и обратно пропорциональна длине базы машины [191].

Передняя ось машины движется по большему радиусу, чем задняя ось $R_{II} > R_3$. Это увеличивает габаритный коридор при криволинейном движении машины. Отношение радиусов поворота [191]

$$\frac{R_{II}}{R_3} = \frac{1}{\cos \varphi_K} \geq 1. \quad (5.1.1)$$

С увеличением φ_K отношение радиусов поворота увеличивается. При $\varphi_K = 0$ (прямолинейное движение) передние и задние колеса идут по одной колее. Необходимо отметить, что отношение радиусов поворота определяется только одним параметром – углом поворота передних колес φ_K и не зависит ни от длины базы машины L , ни от скорости движения машины V [191].

Разность радиусов поворота существенно влияет на ширину габаритного коридора [191]

$$\Delta R = R_{II} - R_3 = L \frac{1 - \cos \varphi_K}{\sin \varphi_K} = L \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_K}{2}, \quad (5.1.2)$$

и определяется двумя параметрами: длиной базы машины L и углом поворота передних колес φ_K , как видно из рисунка 5.1.1.

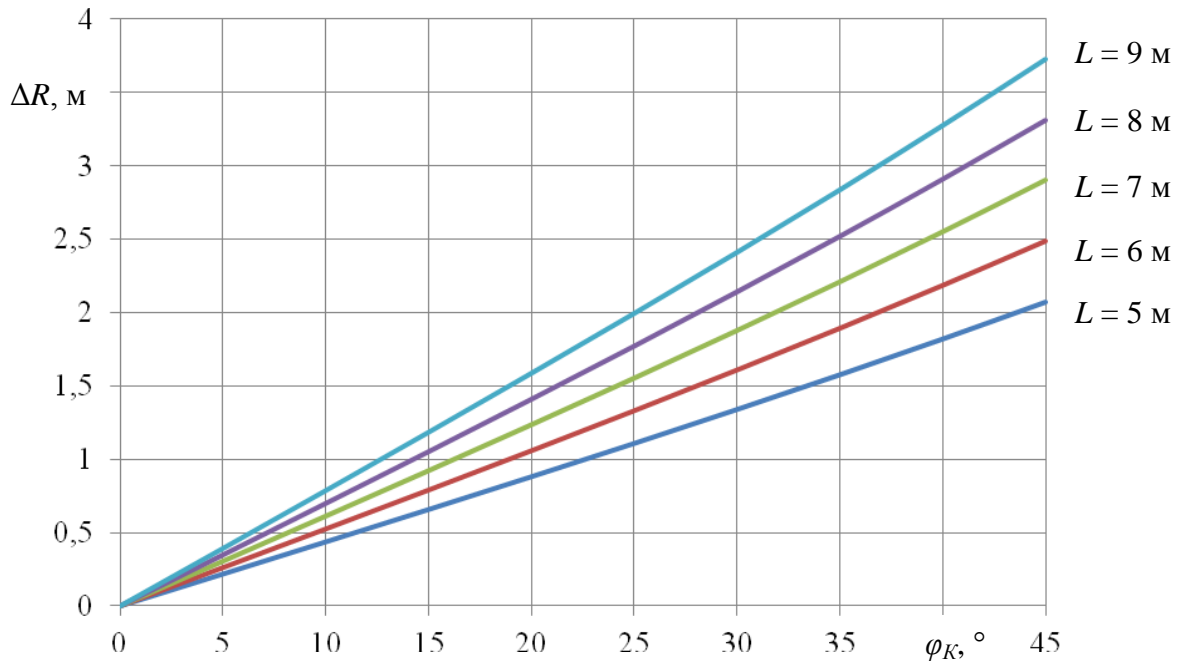


Рисунок 5.1.1 – Зависимость разности радиусов поворота дорожно-строительной машины ΔR от угла поворота передних колес φ_K для различных длин базы L

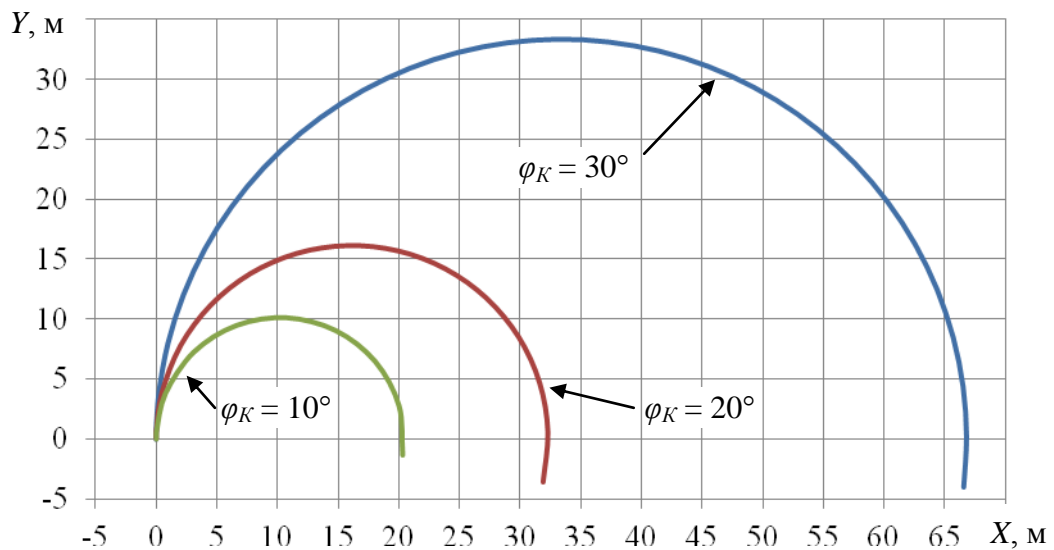


Рисунок 5.1.2 – Примеры расчетов траектории по имитационной модели дорожно-строительной машины с передними поворотными колесами при различных значениях $\varphi_K = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ ($L = 5$ м)

На рисунке 5.1.2 приведены примеры расчетов траектории движения ДСМ по имитационной модели (рисунок 3.7.2) для условий: $L = 5$ м, $V = 2$ м/с, $\gamma_0 = 0^\circ$, $x_0 = 0$, $y_0 = 0$. Графики траекторий соответствуют разным углам поворота передних колес $\varphi_K = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ [191].

Дорожно-строительная машина с шарнирно-сочлененной рамой

Радиусы поворота центров осей ДСМ с ШСР можно определить по формулам (3.7.11) и (3.7.12) [191].

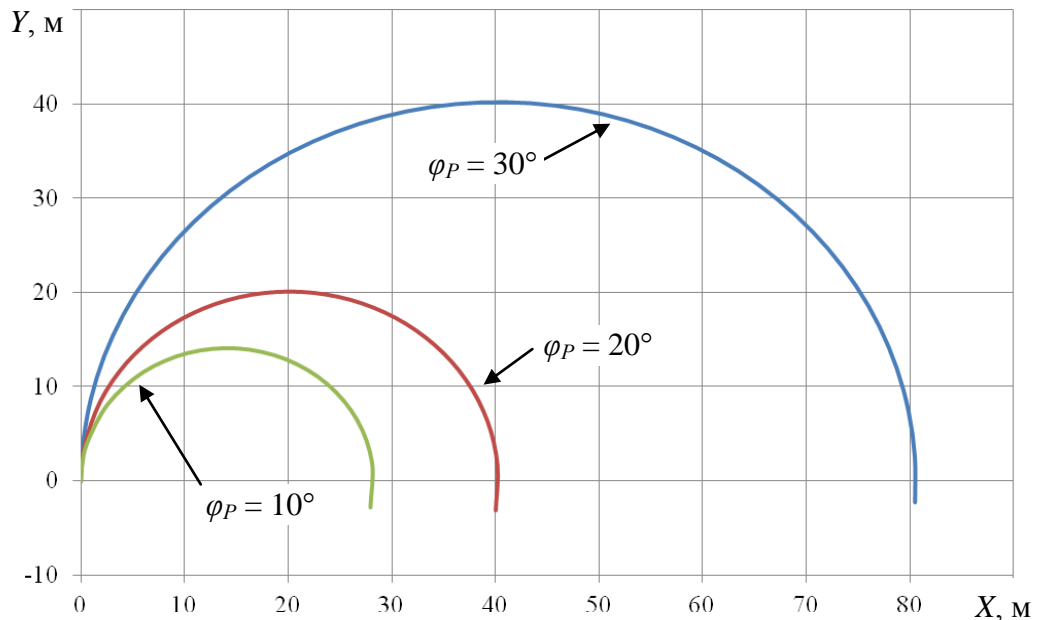


Рисунок 5.1.3 – Примеры расчетов траектории по имитационной модели дорожно-строительной машины с шарнирно-сочлененной рамой при различных значениях $\varphi_P = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ ($L_1 = 5$ м, $L_2 = 2$ м)

Разность радиусов поворота передней и задней осей ДСМ с ШСР может быть найдена по формуле [191]

$$\Delta R = R_{II} - R_3 = \frac{L_1 \cdot \cos \varphi_P + L_2}{\sin \varphi_P} - \frac{L_2 \cdot \cos \varphi_P + L_1}{\sin \varphi_P} = (L_2 - L_1) \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_P}{2} \quad (5.1.3)$$

и определяется тремя параметрами: разницей длин полурам машины и углом складывания полурам φ_P .

На рисунке 5.1.3 приведены пример расчета траектории движения ДСМ с ШСР по имитационной модели (рисунок 3.7.4) для условий: $L_1 = 5$ м, $L_2 = 2$ м, $V = 2$ м/с, $\gamma_0 = 0^\circ$, $x_0 = 0$, $y_0 = 0$. Графики траекторий соответствуют разным углам складывания полурам $\varphi_P = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ [191].

Дорожно-строительная машина с шарнирно-сочлененной рамой и передними поворотными колесами

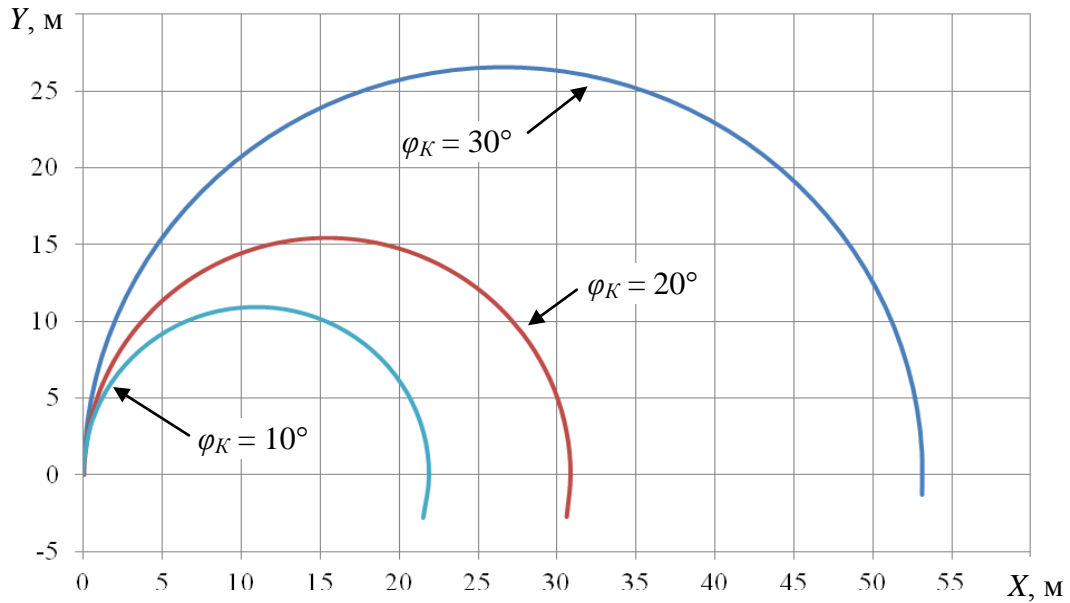


Рисунок 5.1.4 – Примеры расчетов траектории по имитационной модели дорожно-строительной машины с шарнирно-сочлененной рамой и передними поворотными колесами при $\varphi_P = 5^\circ$ и различных значениях $\varphi_K = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ ($L_1 = 5$ м, $L_2 = 2$ м)

Радиусы поворота центров передней и задней осей ДСМ с ШСР и передними поворотными колесами можно определить по формулам (3.7.14) и (3.7.15) [191].

На рисунке 5.1.4 приведены пример расчета траектории движения ДСМ по имитационной модели (рисунок 3.7.6) для условий: $L_1 = 5$ м, $L_2 = 2$ м, $V = 2$ м/с, $\varphi_P = 5^\circ$, $\gamma_0 = 0^\circ$, $x_0 = 0$, $y_0 = 0$. Графики траекторий соответствуют разным углам поворота передних колес $\varphi_K = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ [191].

При повороте колесной ДСМ часто возникает необходимость движения колес передней и задней осей по одной траектории, это значит, что радиусы поворота центров передней и задней осей должны быть равны [32]. В случае ДСМ с передними управляемыми колесами это возможно только в одном случае [191]:

$$\frac{L}{\sin \varphi_K} = \frac{L}{\operatorname{tg} \varphi_K}; \quad (5.1.4)$$

$$\varphi_K = 0, \quad (5.1.5)$$

т.е. при прямолинейном движении.

В случае ДСМ с ШСР это достигается в двух случаях [191]:

$$\frac{L_1 \cdot \cos \varphi_P + L_2}{\sin \varphi_P} = \frac{L_2 \cdot \cos \varphi_P + L_1}{\sin \varphi_P}; \quad (5.1.6)$$

$$L_1 \cdot \cos \varphi_P - L_1 = L_2 \cdot \cos \varphi_P - L_2; \quad (5.1.7)$$

$$(L_1 - L_2)(\cos \varphi_P - 1) = 0, \quad (5.1.8)$$

либо при равенстве длин полурам $L_1 = L_2$, либо при прямолинейном движении $\varphi_P = 0$.

Для обеспечения движения колес по одной траектории ДСМ с ШСР и передними управляемыми колесами необходимо обеспечить равенство формул (3.7.14) и (3.7.15) [191]:

$$\frac{L_2 + L_1 \cdot \cos \varphi_P}{\sin(\varphi_P + \varphi_K)} = \frac{L_2 \cdot \cos(\varphi_P + \varphi_K) + L_1 \cdot \cos \varphi_K}{\sin(\varphi_P + \varphi_K)}. \quad (5.1.9)$$

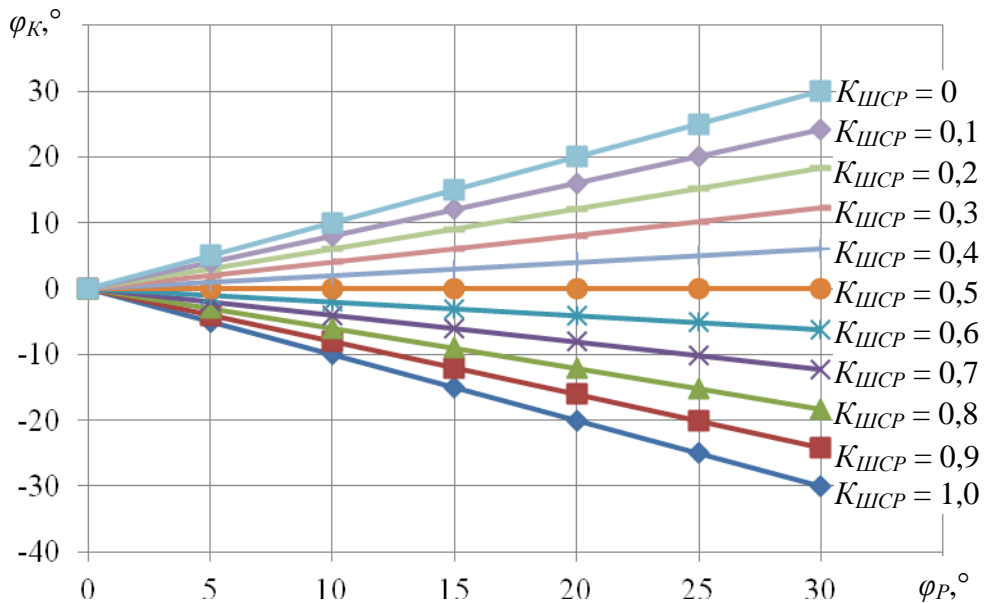


Рисунок 5.1.5 – Зависимость угла поворота передних колес от угла складывания полурам при разных значениях коэффициента шарнирно-сочлененной рамы для случая движения обеих осей по одной траектории

Учитывая, что длина базы машины $L = L_1 + L_2$, и введя понятие коэффициента ШСР $K_{ШСР} = L_1/L$, получим [191]:

$$2 \cdot K_{ШСР} - 1 = \frac{\operatorname{tg} \varphi_K / 2}{\operatorname{tg} \varphi_P / 2}, \quad (5.1.10)$$

или выразив из этой формулы φ_K , получим

$$\varphi_K = 2 \cdot \operatorname{arctg}((2 \cdot K_{ШСР} - 1) \operatorname{tg} \varphi_P / 2). \quad (5.1.11)$$

При изменении значений $K_{ШСР}$ от 0 до 1, а значений φ_P от 0° до 30° , были получены зависимости, представленные на рисунке 5.1.5 [191].

На графике (рисунок 5.1.5) положительное значение φ_K соответствует повороту передних колес налево, а отрицательное – направо. Таким образом, при коэффициентах ШСР от 0,5 до 1, для движения колес передней и задней осей по одной траектории, передние колеса необходимо доворачивать в ту же сторону, что и раму ДСМ, а при коэффициентах ШСР от 0 до 0,5 – в противоположную [191].

Зависимости, представленные на рисунке 5.1.5, можно аппроксимировать с высокой точностью ($R^2 = 0,99$) формулой [191]:

$$\varphi_K = (2 \cdot K_{ШСР} - 1) \varphi_P. \quad (5.1.12)$$

Функциональная зависимость (5.1.12) отражает зависимость угла поворота передних колес от угла складывания полурам и коэффициента ШСР ДСМ для случая движения колес передней и задней оси по одной траектории [191].

5.2. Теоретические исследования метода «чистое преследование» (Pure Pursuit)

Основная задача теоретических исследований математической модели в динамическом режиме – определение оптимальных численных значений параметров метода управления, их зависимости от конструктивных и эксплуатационных параметров ДСМ [196].

При исследованиях на вход математической модели подавалось ступенчатое воздействие – изменение заданной траектории движения на 1 метр (см. рисунок 5.2.1) [165]. В качестве выходного параметра была выбрана траектория движения центральной точки кромки РО. Управляемым параметром являлся угол поворота передних колес [196].

Интегральный критерий эффективности E_T рассчитывался для разности между заданной траекторией и траекторией центральной точки кромки РО [196].

Параметры модели были разделены на три группы:

1. Фиксированные параметры.
2. Параметры, носящие стохастический характер.
3. Варьируемые параметры.

Данное разделение было необходимо для определения степени влияния различных параметров на процесс управления ДСМ.

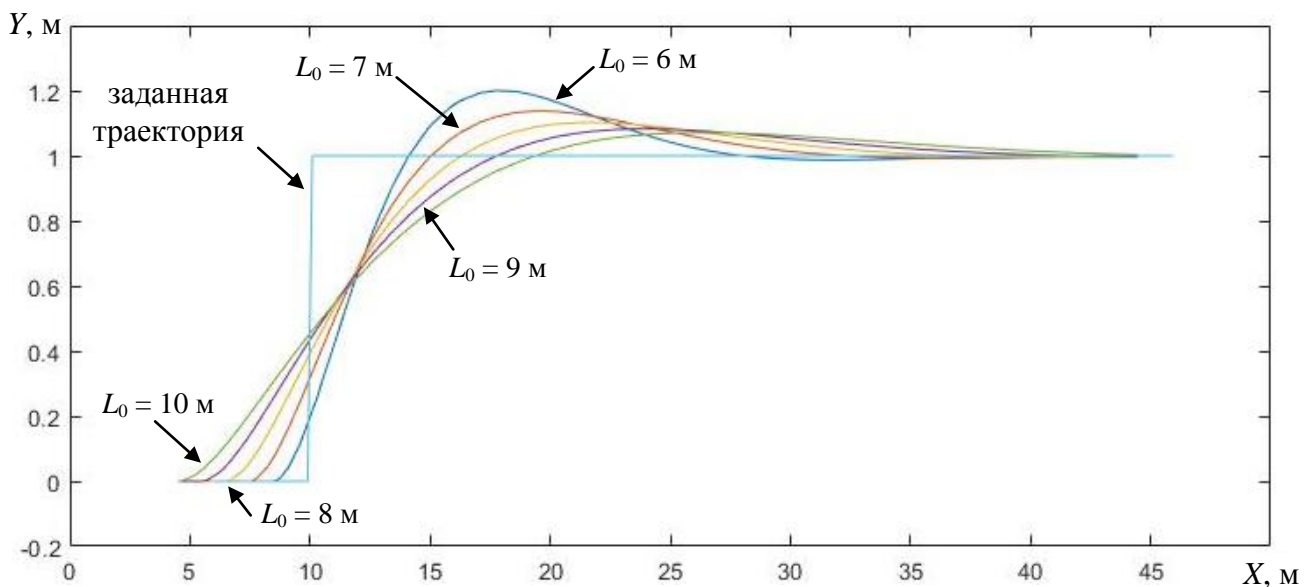


Рисунок 5.2.1 – Траектории движения центральной точки рабочего органа при различных значениях дальности видимости L_0 ($L = 9$ м, $K_0 = 0,5$, $V = 0,5$ м/с)

К фиксированным параметрам были отнесены [196]:

- 1) Тренд реакции грунта на РО.
- 2) Упругие и демпфирующие свойства элементов ходового и рабочего оборудования.

- 3) Массы элементов ДСМ.

К случайным параметрам были отнесены:

- 1) Параметры неровностей микрорельефа.
- 2) Флюктуации реакции грунта на РО.

В ходе проведения исследований было проанализировано влияние различных параметров математической модели на значение критерия эффективности (рисунок 5.2.2). Из рисунка 5.2.2 видно, что зависимости E_T от L_0 имеют явно выраженный экстремум. Наибольшее влияние на критерий эффективности показали такие факторы, как дальность видимости L_0 и скорость машины V [196].

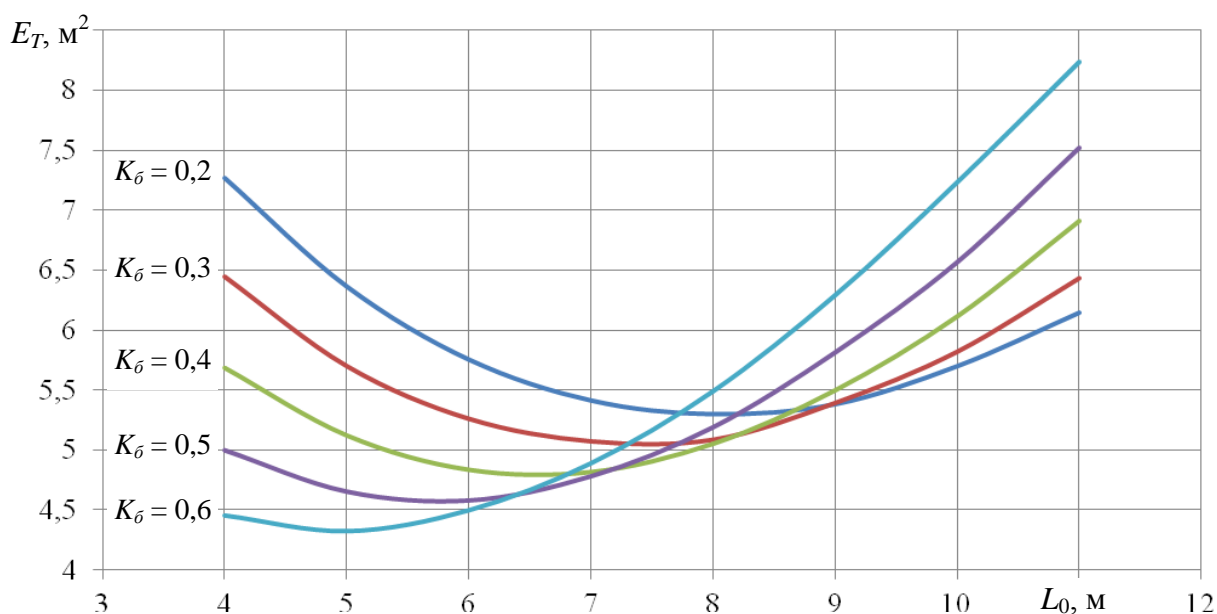


Рисунок 5.2.2 – Влияние дальности видимости L_0 на интегральный критерий E_T при разных значениях коэффициента базы $K_б$ ($L = 9$ м, $V = 0,5$ м/с)

Согласно техническим характеристикам, большинство современных автогрейдеров во время рабочего цикла развивают скорость до 6-8 км/ч. В эксперименте скорость изменялась в пределах от 0,5 до 2,5 м/с, что соответствует 1,8 и 9 км/ч. Длина базы автогрейдера изменялась в пределах от 5 до 9 метров, что соответствует большинству выпускаемых автогрейдеров. Не менее важным параметром, влияющим на рабочий процесс, является коэффициент базы, показывающий расположение РО в базе ДСМ [196,230].

В связи с этим варьируемые параметры были разделены на три подгруппы:

- 1) Конструктивные параметры ДСМ (длина базы, коэффициент базы).
- 2) Эксплуатационные параметры ДСМ (скорость машины).
- 3) Параметры метода управления (дальность видимости L_0).

Диапазон и шаг изменения факторов был принят следующим образом:

- 1) Длина базы $L = 5 \dots 9$ м, шаг 1 м;
- 2) Коэффициент базы $K_b = 0,2 \dots 0,6$, шаг 0,1.
- 3) Скорость машины $V = 0,5 \dots 2,5$ м/с, шаг 0,5 м/с.
- 4) Дальность видимости $L_0 = 3 \dots 10$ м, шаг 1 м.

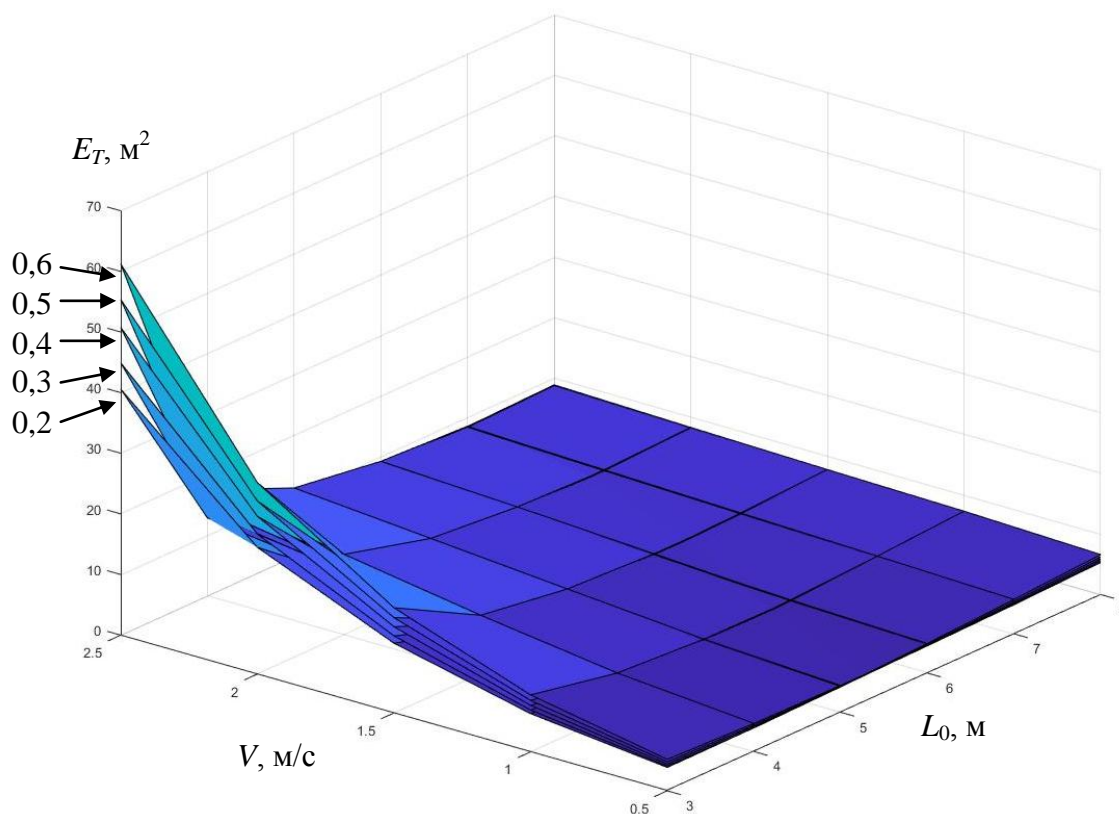


Рисунок 5.2.3 – Зависимости интегрального критерия E_T от дальности видимости L_0 и скорости V при различных значениях коэффициента базы K_b ($L = 5$ м)

Полученные результаты были оформлены в виде графиков (комплекса поверхностей) для различных длин базы и разных значений скорости ДСМ (рисунки 5.2.3 – 5.2.7).

Из полученных зависимостей можно сделать вывод о сильном влиянии скорости ДСМ на критерий эффективности [196].

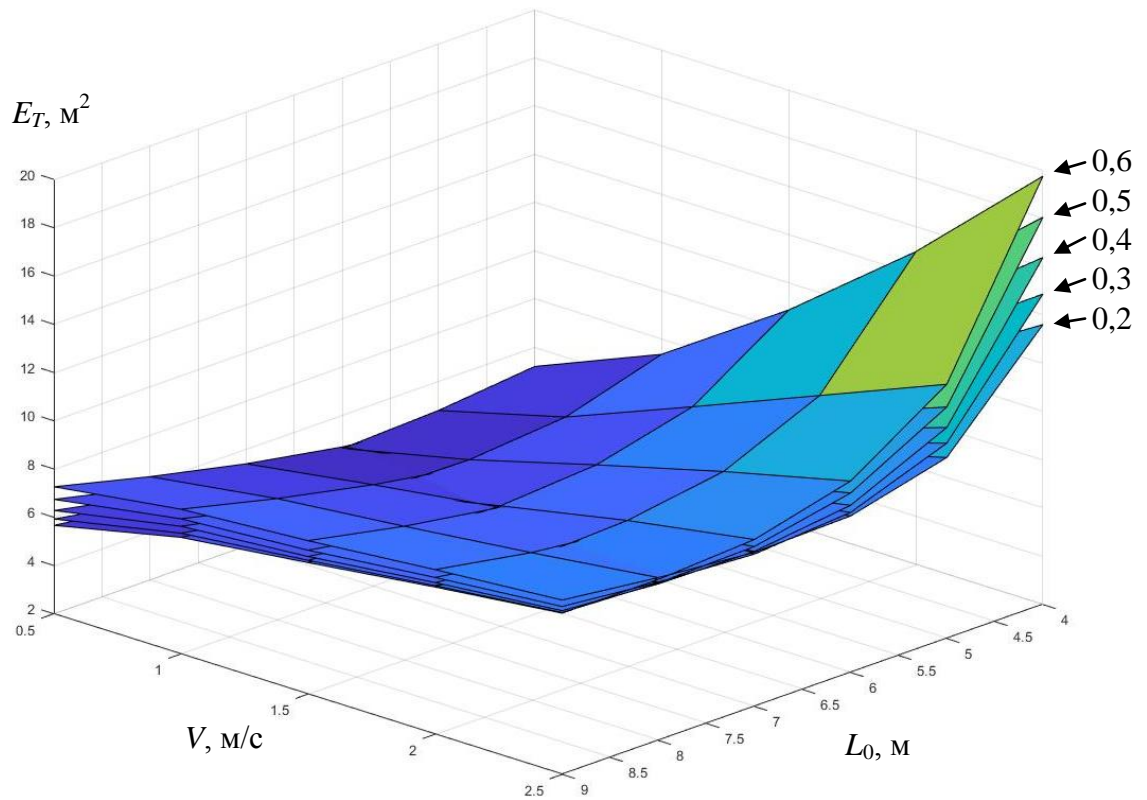


Рисунок 5.2.4 – Зависимости интегрального критерия E_T от дальности видимости L_0 и скорости V при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 6$ м)

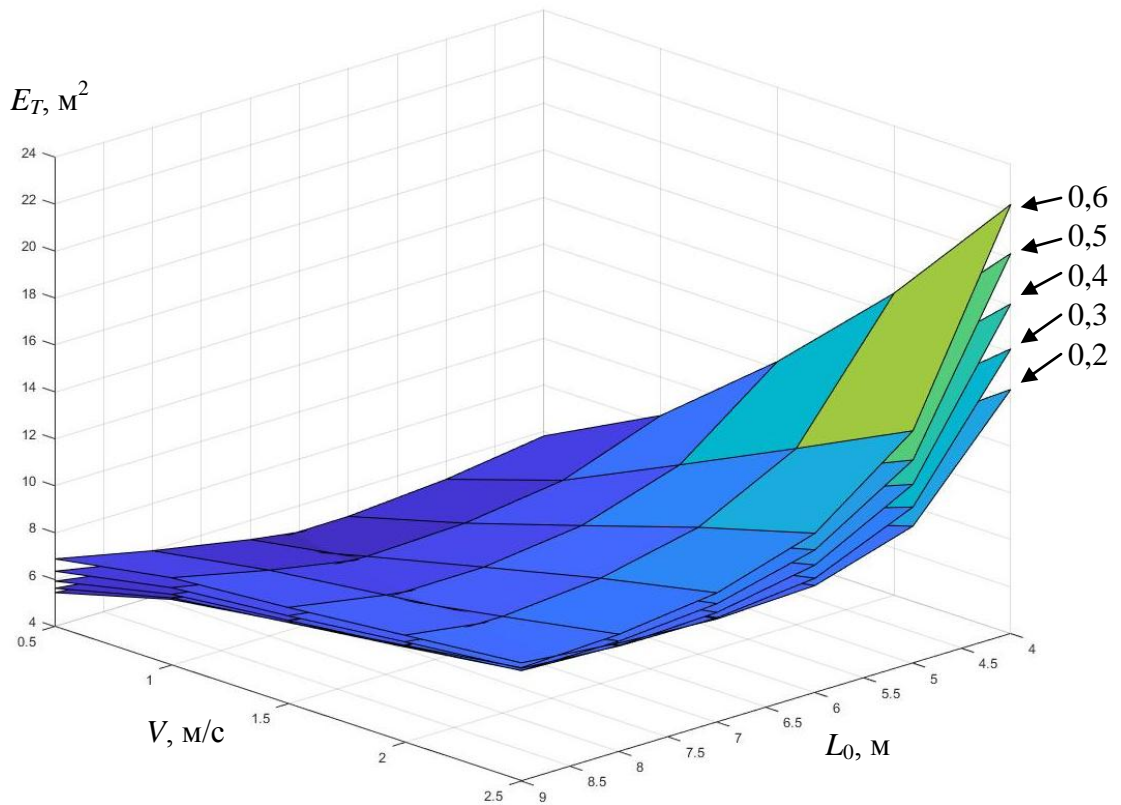


Рисунок 5.2.5 – Зависимости интегрального критерия E_T от дальности видимости L_0 и скорости V при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 7$ м)

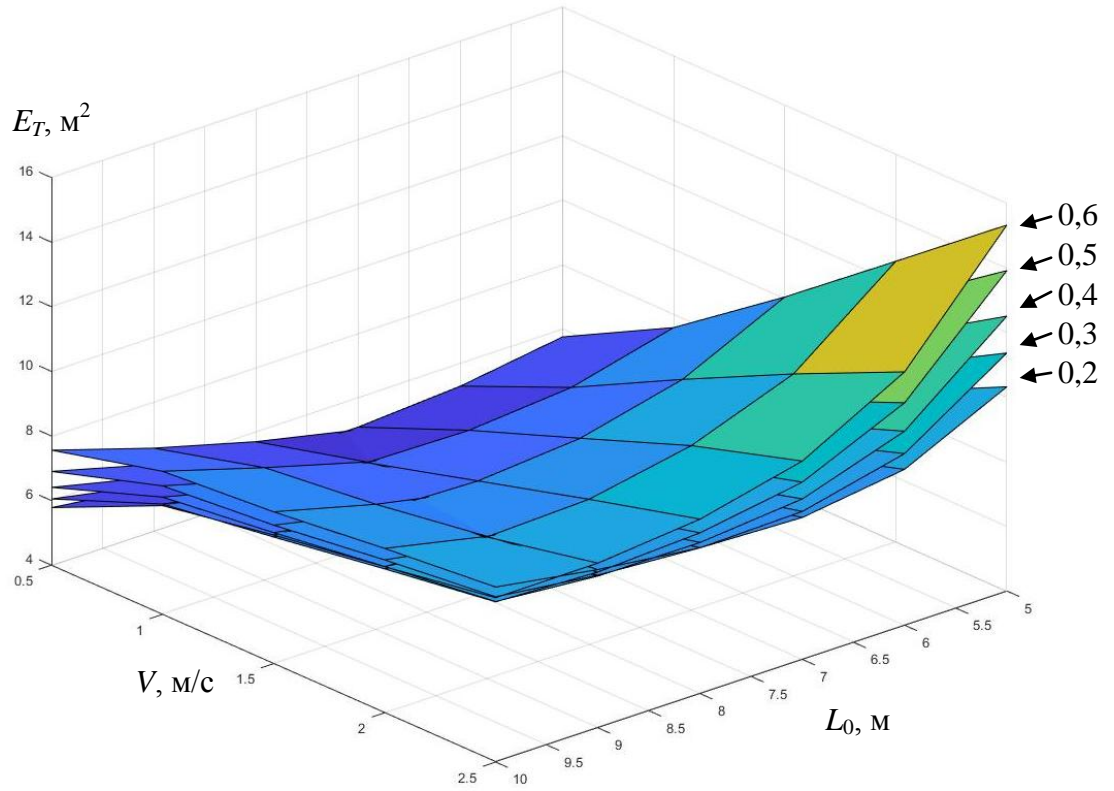


Рисунок 5.2.6 – Зависимости интегрального критерия E_T от дальности видимости L_0 и скорости V при различных значениях коэффициента базы K_b ($L = 8$ м)

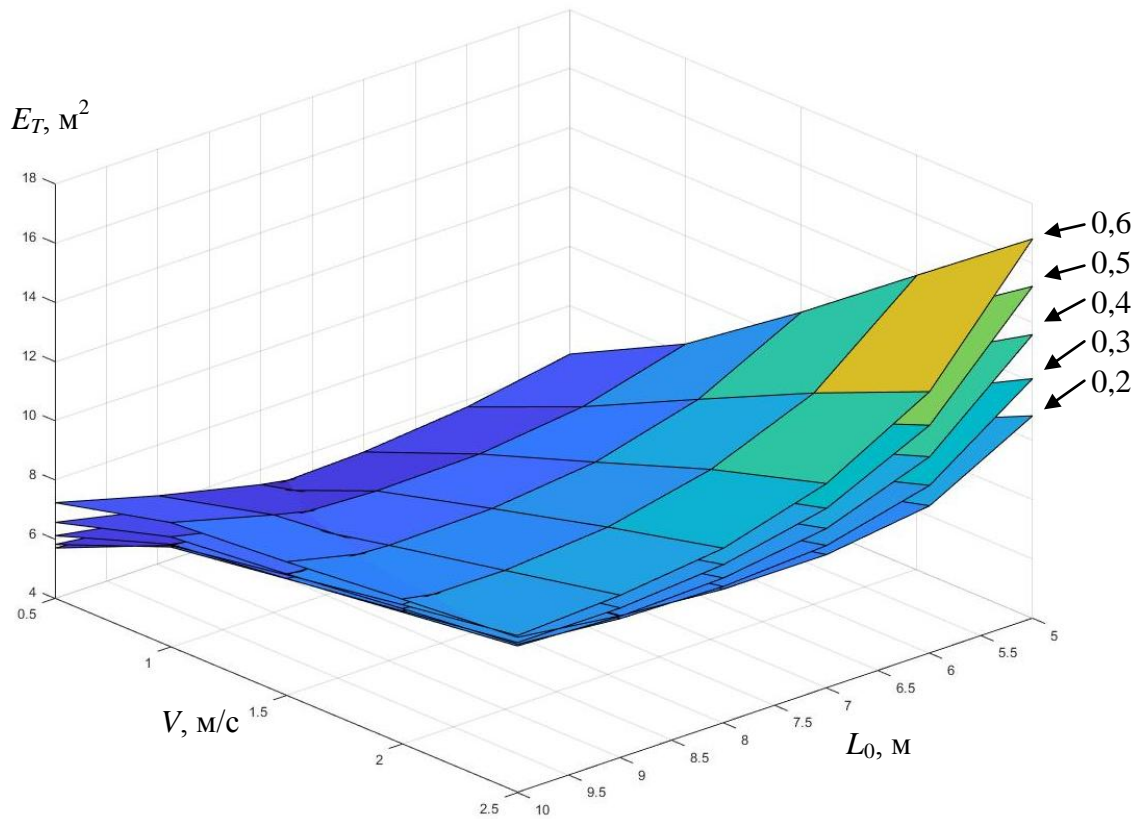


Рисунок 5.2.7 – Зависимости интегрального критерия E_T от дальности видимости L_0 и скорости V при различных значениях коэффициента базы K_b ($L = 9$ м)

Поскольку в оригинальном методе «чистое преследование» скорость не учитывается, было предложено модифицировать метод и ввести в него параметр скорости. Полученные зависимости были аппроксимированы методом наименьших квадратов (описание метода в п. 2.1).

Таблица 5.1

Уравнения регрессии (при $L = 5$ м)

K_6	V	Уравнение регрессии	R^2
0,2	0,5	$E_T = 0,00141 \cdot L_0^4 - 0,03163 \cdot L_0^3 + 0,439 \cdot L_0^2 - 2,657 \cdot L_0 + 9,973$	0,999
	1	$E_T = 0,01508 \cdot L_0^4 - 0,4231 \cdot L_0^3 + 4,525 \cdot L_0^2 - 21,47 \cdot L_0 + 43,26$	0,999
	1,5	$E_T = 0,01599 \cdot L_0^4 - 0,478 \cdot L_0^3 + 5,467 \cdot L_0^2 - 28,07 \cdot L_0 + 60,94$	0,999
	2	$E_T = 0,008629 \cdot L_0^4 - 0,2837 \cdot L_0^3 + 3,655 \cdot L_0^2 - 21,46 \cdot L_0 + 55,44$	0,999
	2,5	$E_T = 0,01923 \cdot L_0^4 - 0,6295 \cdot L_0^3 + 7,854 \cdot L_0^2 - 44,09 \cdot L_0 + 102,1$	0,999
0,3	0,5	$E_T = 0,001027 \cdot L_0^4 - 0,02954 \cdot L_0^3 + 0,4243 \cdot L_0^2 - 2,475 \cdot L_0 + 9,097$	0,999
	1	$E_T = 0,004935 \cdot L_0^4 - 0,1546 \cdot L_0^3 + 1,906 \cdot L_0^2 - 10,2 \cdot L_0 + 24,97$	0,999
	1,5	$E_T = 0,0146 \cdot L_0^4 - 0,4394 \cdot L_0^3 + 5,045 \cdot L_0^2 - 25,79 \cdot L_0 + 55,74$	0,999
	2	$E_T = 0,0147 \cdot L_0^4 - 0,4584 \cdot L_0^3 + 5,94 \cdot L_0^2 - 29,67 \cdot L_0 + 68,01$	0,999
	2,5	$E_T = 0,03309 \cdot L_0^4 - 1,018 \cdot L_0^3 + 11,83 \cdot L_0^2 - 61,51 \cdot L_0 + 129$	0,999
0,4	0,5	$E_T = 0,0001146 \cdot L_0^4 - 0,01064 \cdot L_0^3 + 0,2801 \cdot L_0^2 - 1,855 \cdot L_0 + 7,723$	0,999
	1	$E_T = 0,003963 \cdot L_0^4 - 0,1278 \cdot L_0^3 + 1,62 \cdot L_0^2 - 8,669 \cdot L_0 + 21,56$	0,999
	1,5	$E_T = 0,01568 \cdot L_0^4 - 0,4579 \cdot L_0^3 + 5,094 \cdot L_0^2 - 25,14 \cdot L_0 + 52,58$	0,999
	2	$E_T = 0,007287 \cdot L_0^4 - 0,2452 \cdot L_0^3 + 3,201 \cdot L_0^2 - 18,62 \cdot L_0 + 47,61$	0,999
	2,5	$E_T = 0,01306 \cdot L_0^4 - 0,4462 \cdot L_0^3 + 5,773 \cdot L_0^2 - 33,1 \cdot L_0 + 78,92$	0,999
0,5	0,5	$E_T = 0,00208 \cdot L_0^4 - 0,05954 \cdot L_0^3 + 0,7104 \cdot L_0^2 - 3,288 \cdot L_0 + 8,978$	0,999
	1	$E_T = 0,01511 \cdot L_0^4 - 0,3941 \cdot L_0^3 + 3,934 \cdot L_0^2 - 17,17 \cdot L_0 + 32,41$	0,999
	1,5	$E_T = 0,01698 \cdot L_0^4 - 0,4816 \cdot L_0^3 + 5,202 \cdot L_0^2 - 24,84 \cdot L_0 + 50,36$	0,999
	2	$E_T = 0,02079 \cdot L_0^4 - 0,6228 \cdot L_0^3 + 7,079 \cdot L_0^2 - 35,76 \cdot L_0 + 74,86$	0,999
	2,5	$E_T = 0,009242 \cdot L_0^4 - 0,3324 \cdot L_0^3 + 4,485 \cdot L_0^2 - 26,42 \cdot L_0 + 65,45$	0,999
0,6	0,5	$E_T = 0,001054 \cdot L_0^4 - 0,03673 \cdot L_0^3 + 0,5177 \cdot L_0^2 - 2,434 \cdot L_0 + 7,425$	0,999
	1	$E_T = 0,02293 \cdot L_0^4 - 0,5369 \cdot L_0^3 + 4,818 \cdot L_0^2 - 19,05 \cdot L_0 + 32,71$	0,999
	1,5	$E_T = 0,027 \cdot L_0^4 - 0,7108 \cdot L_0^3 + 7,079 \cdot L_0^2 - 31,14 \cdot L_0 + 57,21$	0,999
	2	$E_T = 0,0193 \cdot L_0^4 - 0,5719 \cdot L_0^3 + 6,428 \cdot L_0^2 - 31,99 \cdot L_0 + 66,63$	0,999
	2,5	$E_T = 0,009921 \cdot L_0^4 - 0,3376 \cdot L_0^3 + 4,346 \cdot L_0^2 - 24,55 \cdot L_0 + 59,4$	0,999

Уравнения регрессии (при $L = 6$ м)

K_6	V	Уравнение регрессии	R^2
0,2	0,5	$E_T = -0,000227 \cdot L_0^4 + 0,001235 \cdot L_0^3 + 0,161 \cdot L_0^2 - 1,876 \cdot L_0 + 10,13$	0,999
	1	$E_T = 0,005084 \cdot L_0^4 - 0,1661 \cdot L_0^3 + 2,125 \cdot L_0^2 - 12,05 \cdot L_0 + 30,91$	0,999
	1,5	$E_T = 0,00672 \cdot L_0^4 - 0,2274 \cdot L_0^3 + 2,991 \cdot L_0^2 - 17,72 \cdot L_0 + 46,33$	0,999
	2	$E_T = -0,006496 \cdot L_0^4 + 0,187 \cdot L_0^3 - 1,787 \cdot L_0^2 + 6,039 \cdot L_0 + 4,799$	0,999
	2,5	$E_T = 0,02168 \cdot L_0^4 - 0,7347 \cdot L_0^3 + 9,416 \cdot L_0^2 - 54,07 \cdot L_0 + 126$	0,999
0,3	0,5	$E_T = 0,00053 \cdot L_0^4 - 0,01916 \cdot L_0^3 + 0,3549 \cdot L_0^2 - 2,501 \cdot L_0 + 10,19$	0,999
	1	$E_T = 0,006454 \cdot L_0^4 - 0,1968 \cdot L_0^3 + 2,359 \cdot L_0^2 - 12,57 \cdot L_0 + 30,24$	0,999
	1,5	$E_T = -0,009687 \cdot L_0^4 + 0,2431 \cdot L_0^3 - 2,014 \cdot L_0^2 + 5,822 \cdot L_0 + 4,57$	0,999
	2	$E_T = 0,002477 \cdot L_0^4 - 0,1129 \cdot L_0^3 + 1,919 \cdot L_0^2 - 13,86 \cdot L_0 + 43,55$	0,999
	2,5	$E_T = 0,01276 \cdot L_0^4 - 0,4527 \cdot L_0^3 + 6,094 \cdot L_0^2 - 36,64 \cdot L_0 + 91,14$	0,999
0,4	0,5	$E_T = 0,001254 \cdot L_0^4 - 0,03565 \cdot L_0^3 + 0,4852 \cdot L_0^2 - 2,768 \cdot L_0 + 9,685$	0,999
	1	$E_T = 0,00645 \cdot L_0^4 - 0,1942 \cdot L_0^3 + 2,293 \cdot L_0^2 - 11,88 \cdot L_0 + 27,78$	0,999
	1,5	$E_T = 0,008 \cdot L_0^4 - 0,2586 \cdot L_0^3 + 3,214 \cdot L_0^2 - 17,69 \cdot L_0 + 42,6$	0,999
	2	$E_T = 0,00279 \cdot L_0^4 - 0,1194 \cdot L_0^3 + 1,933 \cdot L_0^2 - 13,35 \cdot L_0 + 40,61$	0,999
	2,5	$E_T = 0,009446 \cdot L_0^4 - 0,3361 \cdot L_0^3 + 4,552 \cdot L_0^2 - 27,42 \cdot L_0 + 69,98$	0,999
0,5	0,5	$E_T = -0,0001646 \cdot L_0^4 - 0,0052 \cdot L_0^3 + 0,2456 \cdot L_0^2 - 1,786 \cdot L_0 + 7,739$	0,999
	1	$E_T = 0,006171 \cdot L_0^4 - 0,1838 \cdot L_0^3 + 2,137 \cdot L_0^2 - 10,74 \cdot L_0 + 24,59$	0,999
	1,5	$E_T = 0,009328 \cdot L_0^4 - 0,2978 \cdot L_0^3 + 3,621 \cdot L_0^2 - 19,29 \cdot L_0 + 44,15$	0,999
	2	$E_T = 0,003067 \cdot L_0^4 - 0,124 \cdot L_0^3 + 1,92 \cdot L_0^2 - 12,7 \cdot L_0 + 37,57$	0,999
	2,5	$E_T = 0,01753 \cdot L_0^4 - 0,5965 \cdot L_0^3 + 7,641 \cdot L_0^2 - 43,27 \cdot L_0 + 99,32$	0,999
0,6	0,5	$E_T = 0,00115 \cdot L_0^4 - 0,03496 \cdot L_0^3 + 0,4822 \cdot L_0^2 - 2,397 \cdot L_0 + 7,779$	0,999
	1	$E_T = 0,01438 \cdot L_0^4 - 0,38 \cdot L_0^3 + 3,832 \cdot L_0^2 - 16,8 \cdot L_0 + 31,84$	0,999
	1,5	$E_T = 0,01364 \cdot L_0^4 - 0,4023 \cdot L_0^3 + 4,514 \cdot L_0^2 - 22,23 \cdot L_0 + 46,6$	0,999
	2	$E_T = 0,0008875 \cdot L_0^4 - 0,05294 \cdot L_0^3 + 1,41 \cdot L_0^2 - 7,703 \cdot L_0 + 26,62$	0,999
	2,5	$E_T = 0,01011 \cdot L_0^4 - 0,3482 \cdot L_0^3 + 4,543 \cdot L_0^2 - 26,08 \cdot L_0 + 63,57$	0,999

Уравнения регрессии (при $L = 7$ м)

K_6	V	Уравнение регрессии	R^2
0,2	0,5	$E_T = 0,00033 \cdot L_0^4 - 0,01198 \cdot L_0^3 + 0,2712 \cdot L_0^2 - 2,427 \cdot L_0 + 11,89$	0,999
	1	$E_T = -0,0004667 \cdot L_0^4 - 0,0027 \cdot L_0^3 + 0,3696 \cdot L_0^2 - 4,08 \cdot L_0 + 18,64$	0,999
	1,5	$E_T = 0,0095 \cdot L_0^4 - 0,321 \cdot L_0^3 + 4,175 \cdot L_0^2 - 24,52 \cdot L_0 + 61,65$	0,999
	2	$E_T = 0,001196 \cdot L_0^4 - 0,05904 \cdot L_0^3 + 1,156 \cdot L_0^2 - 9,766 \cdot L_0 + 37,57$	0,999
	2,5	$E_T = 0,01713 \cdot L_0^4 - 0,5874 \cdot L_0^3 + 7,671 \cdot L_0^2 - 45,34 \cdot L_0 + 111,3$	0,999
0,3	0,5	$E_T = -0,000623 \cdot L_0^4 + 0,01024 \cdot L_0^3 + 0,08347 \cdot L_0^2 - 1,591 \cdot L_0 + 9,807$	0,999
	1	$E_T = -0,006454 \cdot L_0^4 + 0,1647 \cdot L_0^3 - 1,368 \cdot L_0^2 + 3,999 \cdot L_0 + 3,921$	0,999
	1,5	$E_T = 0,002506 \cdot L_0^4 - 0,102 \cdot L_0^3 + 1,619 \cdot L_0^2 - 11,21 \cdot L_0 + 35,08$	0,999
	2	$E_T = -0,000054 \cdot L_0^4 - 0,01849 \cdot L_0^3 + 0,6534 \cdot L_0^2 - 6,786 \cdot L_0 + 30,05$	0,999
	2,5	$E_T = 0,01075 \cdot L_0^4 - 0,3817 \cdot L_0^3 + 5,191 \cdot L_0^2 - 31,92 \cdot L_0 + 83,24$	0,999
0,4	0,5	$E_T = 0,001167 \cdot L_0^4 - 0,03524 \cdot L_0^3 + 0,5027 \cdot L_0^2 - 3,09 \cdot L_0 + 11,06$	0,999
	1	$E_T = 0,00938 \cdot L_0^4 - 0,1336 \cdot L_0^3 + 1,78 \cdot L_0^2 - 10,27 \cdot L_0 + 26,92$	0,999
	1,5	$E_T = 0,004113 \cdot L_0^4 - 0,1494 \cdot L_0^3 + 2,115 \cdot L_0^2 - 13,19 \cdot L_0 + 36,86$	0,999
	2	$E_T = 0,0067 \cdot L_0^4 - 0,2365 \cdot L_0^3 + 3,248 \cdot L_0^2 - 20,09 \cdot L_0 + 54,27$	0,999
	2,5	$E_T = 0,003833 \cdot L_0^4 - 0,1589 \cdot L_0^3 + 2,509 \cdot L_0^2 - 17,44 \cdot L_0 + 53,09$	0,999
0,5	0,5	$E_T = 0,00141 \cdot L_0^4 - 0,04018 \cdot L_0^3 + 0,5349 \cdot L_0^2 - 2,983 \cdot L_0 + 9,967$	0,999
	1	$E_T = 0,004994 \cdot L_0^4 - 0,1564 \cdot L_0^3 + 1,928 \cdot L_0^2 - 10,31 \cdot L_0 + 25,22$	0,999
	1,5	$E_T = 0,00629 \cdot L_0^4 - 0,2091 \cdot L_0^3 + 2,686 \cdot L_0^2 - 15,2 \cdot L_0 + 38,18$	0,999
	2	$E_T = 0,0132 \cdot L_0^4 - 0,4081 \cdot L_0^3 + 4,879 \cdot L_0^2 - 26,43 \cdot L_0 + 61,82$	0,999
	2,5	$E_T = 0,006646 \cdot L_0^4 - 0,2389 \cdot L_0^3 + 3,3 \cdot L_0^2 - 20,33 \cdot L_0 + 55,05$	0,999
0,6	0,5	$E_T = 0,0004729 \cdot L_0^4 - 0,02105 \cdot L_0^3 + 0,3884 \cdot L_0^2 - 2,287 \cdot L_0 + 8,245$	0,999
	1	$E_T = 0,004425 \cdot L_0^4 - 0,1406 \cdot L_0^3 + 1,742 \cdot L_0^2 - 9,104 \cdot L_0 + 21,95$	0,999
	1,5	$E_T = 0,009121 \cdot L_0^4 - 0,2833 \cdot L_0^3 + 3,377 \cdot L_0^2 - 17,67 \cdot L_0 + 40,37$	0,999
	2	$E_T = 0,005025 \cdot L_0^4 - 0,1798 \cdot L_0^3 + 2,489 \cdot L_0^2 - 15,1 \cdot L_0 + 40,91$	0,999
	2,5	$E_T = 0,009038 \cdot L_0^4 - 0,308 \cdot L_0^3 + 4,001 \cdot L_0^2 - 23,05 \cdot L_0 + 57,65$	0,999

Уравнения регрессии (при $L = 8$ м)

K_6	V	Уравнение регрессии	R^2
0,2	0,5	$E_T = -0,01027 \cdot L_0^4 + 0,3209 \cdot L_0^3 - 3,607 \cdot L_0^2 + 17,27 \cdot L_0 - 24,46$	0,999
	1	$E_T = 0,00511 \cdot L_0^4 - 0,1693 \cdot L_0^3 + 2,204 \cdot L_0^2 - 13,07 \cdot L_0 + 35,78$	0,999
	1,5	$E_T = 0,000198 \cdot L_0^4 - 0,0278 \cdot L_0^3 + 0,7747 \cdot L_0^2 - 7,522 \cdot L_0 + 31,55$	0,999
	2	$E_T = 0,01167 \cdot L_0^4 - 0,438 \cdot L_0^3 + 6,267 \cdot L_0^2 - 40,36 \cdot L_0 + 106,7$	0,999
	2,5	$E_T = 0,007383 \cdot L_0^4 - 0,2749 \cdot L_0^3 + 3,973 \cdot L_0^2 - 26,39 \cdot L_0 + 76,75$	0,999
0,3	0,5	$E_T = 0,002048 \cdot L_0^4 - 0,06376 \cdot L_0^3 + 0,8453 \cdot L_0^2 - 5,202 \cdot L_0 + 16,82$	0,999
	1	$E_T = 0,003546 \cdot L_0^4 - 0,1223 \cdot L_0^3 + 1,68 \cdot L_0^2 - 10,34 \cdot L_0 + 29,64$	0,999
	1,5	$E_T = 0,01715 \cdot L_0^4 - 0,5663 \cdot L_0^3 + 7,079 \cdot L_0^2 - 39,58 \cdot L_0 + 90,59$	0,999
	2	$E_T = 0,01134 \cdot L_0^4 - 0,4235 \cdot L_0^3 + 6,024 \cdot L_0^2 - 38,41 \cdot L_0 + 100,2$	0,999
	2,5	$E_T = 0,003837 \cdot L_0^4 - 0,1416 \cdot L_0^3 + 2,098 \cdot L_0^2 - 14,56 \cdot L_0 + 47,95$	0,999
0,4	0,5	$E_T = -0,00223 \cdot L_0^4 + 0,05274 \cdot L_0^3 - 0,3259 \cdot L_0^2 + 0,1268 \cdot L_0 + 7,107$	0,999
	1	$E_T = 0,004863 \cdot L_0^4 - 0,1611 \cdot L_0^3 + 2,091 \cdot L_0^2 - 12,01 \cdot L_0 + 31,09$	0,999
	1,5	$E_T = 0,001988 \cdot L_0^4 - 0,07646 \cdot L_0^3 + 1,21 \cdot L_0^2 - 8,511 \cdot L_0 + 28,73$	0,999
	2	$E_T = -0,006479 \cdot L_0^4 + 0,1806 \cdot L_0^3 - 1,628 \cdot L_0^2 + 4,712 \cdot L_0 + 8,471$	0,999
	2,5	$E_T = 0,004504 \cdot L_0^4 - 0,1622 \cdot L_0^3 + 2,312 \cdot L_0^2 - 15,19 \cdot L_0 + 46,84$	0,999
0,5	0,5	$E_T = 0,002469 \cdot L_0^4 - 0,06645 \cdot L_0^3 + 0,7728 \cdot L_0^2 - 4,045 \cdot L_0 + 12,11$	0,999
	1	$E_T = 0,001429 \cdot L_0^4 - 0,05833 \cdot L_0^3 + 0,9462 \cdot L_0^2 - 6,205 \cdot L_0 + 19,44$	0,999
	1,5	$E_T = 0,000952 \cdot L_0^4 - 0,04974 \cdot L_0^3 + 0,9558 \cdot L_0^2 - 7,264 \cdot L_0 + 25,57$	0,999
	2	$E_T = 0,003419 \cdot L_0^4 - 0,1335 \cdot L_0^3 + 2,043 \cdot L_0^2 - 13,82 \cdot L_0 + 41,95$	0,999
	2,5	$E_T = 0,01079 \cdot L_0^4 - 0,3859 \cdot L_0^3 + 5,252 \cdot L_0^2 - 31,92 \cdot L_0 + 81,11$	0,999
0,6	0,5	$E_T = 0,000387 \cdot L_0^4 - 0,01716 \cdot L_0^3 + 0,3422 \cdot L_0^2 - 2,191 \cdot L_0 + 8,537$	0,999
	1	$E_T = 0,005404 \cdot L_0^4 - 0,1657 \cdot L_0^3 + 1,993 \cdot L_0^2 - 10,36 \cdot L_0 + 24,61$	0,999
	1,5	$E_T = 0,004515 \cdot L_0^4 - 0,1537 \cdot L_0^3 + 2,041 \cdot L_0^2 - 11,84 \cdot L_0 + 31,47$	0,999
	2	$E_T = 0,002615 \cdot L_0^4 - 0,1039 \cdot L_0^3 + 1,622 \cdot L_0^2 - 10,94 \cdot L_0 + 34,07$	0,999
	2,5	$E_T = 0,009031 \cdot L_0^4 - 0,3235 \cdot L_0^3 + 4,41 \cdot L_0^2 - 26,66 \cdot L_0 + 68,2$	0,999

Уравнения регрессии (при $L = 9$ м)

K_0	V	Уравнение регрессии	R^2
0,2	0,5	$E_T = -0,001573 \cdot L_0^4 + 0,0499 \cdot L_0^3 - 0,4795 \cdot L_0^2 + 1,295 \cdot L_0 + 6,502$	0,999
	1	$E_T = 0,000502 \cdot L_0^4 - 0,02839 \cdot L_0^3 + 0,6135 \cdot L_0^2 - 5,338 \cdot L_0 + 22,83$	0,999
	1,5	$E_T = 0,003344 \cdot L_0^4 - 0,1334 \cdot L_0^3 + 2,087 \cdot L_0^2 - 14,82 \cdot L_0 + 47,57$	0,999
	2	$E_T = 0,005842 \cdot L_0^4 - 0,2283 \cdot L_0^3 + 3,474 \cdot L_0^2 - 24,19 \cdot L_0 + 73,18$	0,999
	2,5	$E_T = 0,02263 \cdot L_0^4 - 0,8313 \cdot L_0^3 + 11,54 \cdot L_0^2 - 71,91 \cdot L_0 + 179,8$	0,999
0,3	0,5	$E_T = -0,01107 \cdot L_0^4 + 0,3475 \cdot L_0^3 - 3,931 \cdot L_0^2 + 19,01 \cdot L_0 - 28$	0,999
	1	$E_T = 0,005467 \cdot L_0^4 - 0,1891 \cdot L_0^3 + 2,549 \cdot L_0^2 - 15,46 \cdot L_0 + 41,48$	0,999
	1,5	$E_T = 0,003575 \cdot L_0^4 - 0,1517 \cdot L_0^3 + 2,452 \cdot L_0^2 - 17,44 \cdot L_0 + 53,18$	0,999
	2	$E_T = 0,008067 \cdot L_0^4 - 0,306 \cdot L_0^3 + 4,474 \cdot L_0^2 - 29,66 \cdot L_0 + 83$	0,999
	2,5	$E_T = 0,006879 \cdot L_0^4 - 0,2568 \cdot L_0^3 + 3,73 \cdot L_0^2 - 24,94 \cdot L_0 + 73,43$	0,999
0,4	0,5	$E_T = -0,00054 \cdot L_0^4 - 0,01052 \cdot L_0^3 + 0,0637 \cdot L_0^2 - 1,583 \cdot L_0 + 10,47$	0,999
	1	$E_T = 0,001931 \cdot L_0^4 - 0,07339 \cdot L_0^3 + 1,135 \cdot L_0^2 - 7,649 \cdot L_0 + 24,53$	0,999
	1,5	$E_T = 0,01363 \cdot L_0^4 - 0,4582 \cdot L_0^3 + 5,866 \cdot L_0^2 - 33,63 \cdot L_0 + 79,69$	0,999
	2	$E_T = 0,002465 \cdot L_0^4 - 0,1022 \cdot L_0^3 + 1,699 \cdot L_0^2 - 12,72 \cdot L_0 + 43,29$	0,999
	2,5	$E_T = 0,004837 \cdot L_0^4 - 0,1792 \cdot L_0^3 + 2,626 \cdot L_0^2 - 17,8 \cdot L_0 + 55,15$	0,999
0,5	0,5	$E_T = 0,000052 \cdot L_0^4 - 0,00583 \cdot L_0^3 + 0,2215 \cdot L_0^2 - 2,006 \cdot L_0 + 9,836$	0,999
	1	$E_T = -0,000117 \cdot L_0^4 - 0,0144 \cdot L_0^3 + 0,4984 \cdot L_0^2 - 4,39 \cdot L_0 + 17,36$	0,999
	1,5	$E_T = 0,002071 \cdot L_0^4 - 0,08093 \cdot L_0^3 + 1,276 \cdot L_0^2 - 8,803 \cdot L_0 + 28,8$	0,999
	2	$E_T = -0,006388 \cdot L_0^4 + 0,1869 \cdot L_0^3 - 1,834 \cdot L_0^2 + 6,643 \cdot L_0 + 2,513$	0,999
	2,5	$E_T = 0,007625 \cdot L_0^4 - 0,2728 \cdot L_0^3 + 3,761 \cdot L_0^2 - 23,44 \cdot L_0 + 63,86$	0,999
0,6	0,5	$E_T = 0,001658 \cdot L_0^4 - 0,04822 \cdot L_0^3 + 0,6224 \cdot L_0^2 - 3,401 \cdot L_0 + 10,76$	0,999
	1	$E_T = -0,0007042 \cdot L_0^4 + 0,00624 \cdot L_0^3 + 0,2184 \cdot L_0^2 - 2,5 \cdot L_0 + 12,19$	0,999
	1,5	$E_T = 0,005356 \cdot L_0^4 - 0,1774 \cdot L_0^3 + 2,301 \cdot L_0^2 - 13,27 \cdot L_0 + 34,85$	0,999
	2	$E_T = 0,001431 \cdot L_0^4 - 0,0639 \cdot L_0^3 + 1,136 \cdot L_0^2 - 8,527 \cdot L_0 + 30,16$	0,999
	2,5	$E_T = 0,007652 \cdot L_0^4 - 0,2708 \cdot L_0^3 + 3,678 \cdot L_0^2 - 22,36 \cdot L_0 + 59,57$	0,999

В результате проведенной оптимизации (описание метода оптимизации в п. 2.1) были получены оптимальные значения дальности видимости для различных значений длины базы, коэффициента базы и скорости.

Таблица 5.6

Оптимальные значения дальности видимости L_0 при длине базы $L = 5$ м

$V \backslash K_0$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,5	5,26	4,76	4,3	3,83	3,45
1	5,6	5,46	5,13	4,74	4,43
1,5	6,55	6,17	5,84	5,53	5,19
2	7,36	6,92	6,66	6,17	5,91
2,5	7,67	7,54	6,9	6,64	6,4

Таблица 5.7

Оптимальные значения дальности видимости L_0 при длине базы $L = 6$ м

$V \backslash K_0$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,5	6,04	5,44	4,87	4,35	3,78
1	6,22	5,86	5,48	5,12	4,69
1,5	7,14	6,86	6,27	5,9	5,51
2	7,89	7,38	7,02	6,66	6,3
2,5	8,42	7,74	7,29	6,88	6,58

Таблица 5.8

Оптимальные значения дальности видимости L_0 при длине базы $L = 7$ м

$V \backslash K_0$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,5	6,74	6,08	5,43	4,8	4,19
1	6,85	6,5	5,86	5,45	5,03
1,5	7,59	7,25	6,75	6,22	5,75
2	8,42	7,98	7,43	7,01	6,52
2,5	9,17	8,5	7,87	7,3	6,79

Оптимальные значения дальности видимости L_0 при длине базы $L = 8$ м

$V \backslash K_b$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,5	7,55	6,69	6,05	5,24	4,54
1	7,32	6,79	6,26	5,8	5,26
1,5	8,17	7,57	7,23	6,72	6,1
2	8,82	8,3	7,84	7,33	6,81
2,5	9,54	9,06	8,42	7,63	7,16

Таблица 5.10

Оптимальные значения дальности видимости L_0 при длине базы $L = 9$ м

$V \backslash K_b$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,5	8,06	7,48	6,56	5,74	4,88
1	7,79	7,2	6,7	6,16	5,51
1,5	8,66	8,04	7,38	6,98	6,4
2	9,35	8,86	8,3	7,75	7,13
2,5	9,82	9,53	8,9	8,09	7,43

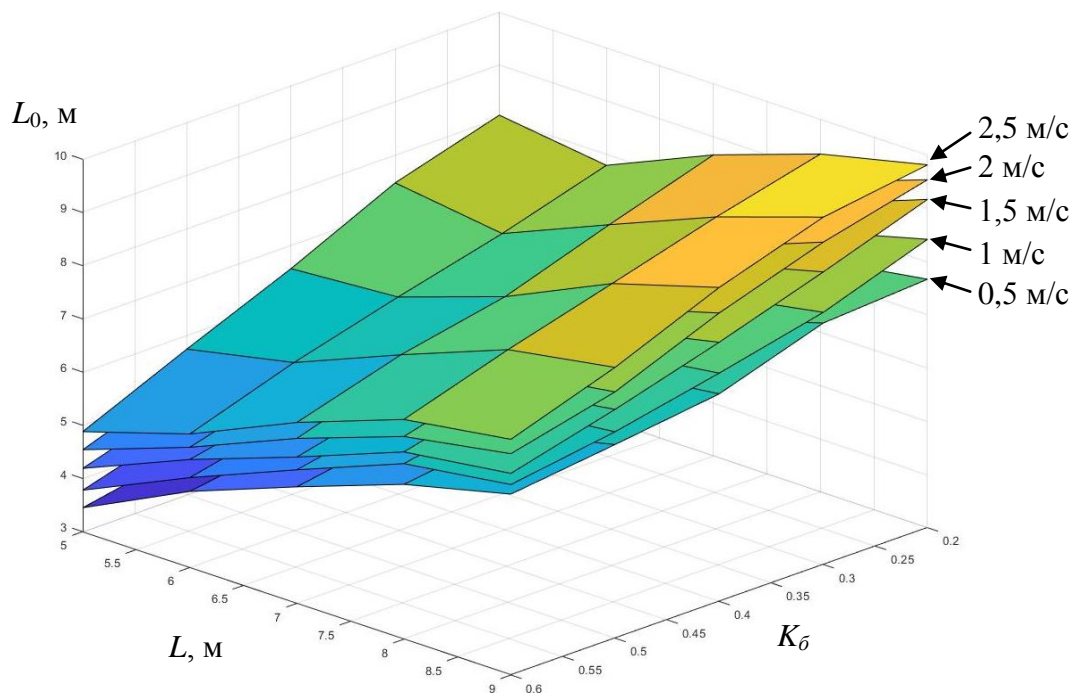


Рисунок 5.2.8 – Зависимости оптимальных значений дальности видимости L_0 при различных значениях скорости V , длины базы L и коэффициента базы K_b

Графики полученных оптимальных значений дальности видимости представлены на рисунке 5.2.8 [196].

Полученные зависимости оптимальных значений дальности видимости от скорости, длины базы и коэффициента базы были аппроксимированы уравнениями регрессии (таблица 5.11) [196].

Таблица 5.11

Уравнения регрессии дальности видимости L_0

$L, \text{ м}$	K_0	Уравнение регрессии	R^2
5	0,2	$L_0 = 1,4 \cdot V + 4,338$	0,967
	0,3	$L_0 = 1,4 \cdot V + 4,07$	0,999
	0,4	$L_0 = 1,4 \cdot V + 3,666$	0,974
	0,5	$L_0 = 1,4 \cdot V + 3,282$	0,985
	0,6	$L_0 = 1,4 \cdot V + 2,976$	0,984
6	0,2	$L_0 = 1,36 \cdot V + 5,102$	0,968
	0,3	$L_0 = 1,36 \cdot V + 4,616$	0,961
	0,4	$L_0 = 1,36 \cdot V + 4,146$	0,976
	0,5	$L_0 = 1,36 \cdot V + 3,742$	0,972
	0,6	$L_0 = 1,36 \cdot V + 3,332$	0,971
7	0,2	$L_0 = 1,32 \cdot V + 5,774$	0,956
	0,3	$L_0 = 1,32 \cdot V + 5,282$	0,991
	0,4	$L_0 = 1,32 \cdot V + 4,688$	0,986
	0,5	$L_0 = 1,32 \cdot V + 4,176$	0,983
	0,6	$L_0 = 1,32 \cdot V + 3,676$	0,976
8	0,2	$L_0 = 1,28 \cdot V + 6,36$	0,872
	0,3	$L_0 = 1,28 \cdot V + 5,762$	0,958
	0,4	$L_0 = 1,28 \cdot V + 5,24$	0,975
	0,5	$L_0 = 1,28 \cdot V + 4,624$	0,975
	0,6	$L_0 = 1,28 \cdot V + 4,054$	0,981
9	0,2	$L_0 = 1,24 \cdot V + 6,876$	0,844
	0,3	$L_0 = 1,24 \cdot V + 6,362$	0,881
	0,4	$L_0 = 1,24 \cdot V + 5,708$	0,958
	0,5	$L_0 = 1,24 \cdot V + 5,084$	0,982
	0,6	$L_0 = 1,24 \cdot V + 4,41$	0,973

Уравнения регрессии имеют вид $L_0 = a_0 \cdot V + a_1$. Как видно из уравнений регрессии коэффициент a_0 зависит только от длины базы L , и может быть аппроксимирован уравнением [196]:

$$a_0 = 1,6 + 0,04 \cdot L. \quad (5.2.1)$$

Свободный коэффициент a_1 в уравнениях регрессии зависит от длины базы и коэффициента базы. Для дальнейшей аппроксимации эти значения были сведены в таблицу 5.12 и полученная зависимость была аппроксимирована выражением:

$$a_1 = 3,2 - 5 \cdot K_b + 0,5 \cdot L. \quad (5.2.2)$$

Таблица 5.12

Коэффициенты a_1 в уравнениях
регрессии дальности видимости L_0

$L \backslash K_b$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
5	4,388	4,07	3,666	3,282	2,976
6	5,102	4,616	4,146	3,742	3,332
7	5,774	5,282	4,688	4,176	3,676
8	6,36	5,762	5,24	4,624	4,054
9	6,876	6,362	5,708	5,084	4,41

Таким образом, в результате проведенных исследований предложен модифицированный метод «чистое преследование», который был адаптирован для управления автогрейдером. Зависимость оптимального значения дальности видимости от скорости, длины базы и коэффициента базы представлена формулой (5.2.3) [196].

$$L_0 = a_0 \cdot V + a_1. \quad (5.2.3)$$

где $a_0 = 1,6 + 0,04 \cdot L$; $a_1 = 3,2 - 5 \cdot K_b + 0,5 \cdot L$.

Как видно из формулы (5.2.3) дальность видимости L_0 , которая в оригинальном методе «чистое преследование» была величиной постоянной, теперь динамически изменяется в зависимости от скорости машины [196].

5.3. Теоретические исследования метода Стэнли (Stanley)

При исследованиях метода Стэнли на вход математической модели подавалось ступенчатое воздействие – изменение заданной траектории движения на 1 метр (см. рисунок 5.3.1) [165,189].

В качестве выходного параметра была выбрана траектория движения центральной точки кромки РО [189].

Интегральный критерий эффективности E_T рассчитывался для разности между заданной траекторией и траекторией центральной точки кромки РО.

Параметры модели были разделены на три группы [189]:

1. Фиксированные параметры.
2. Параметры, носящие стохастический характер.
3. Варьируемые параметры.

Данное разделение было необходимо для определения степени влияния различных параметров на процесс управления ДСМ.

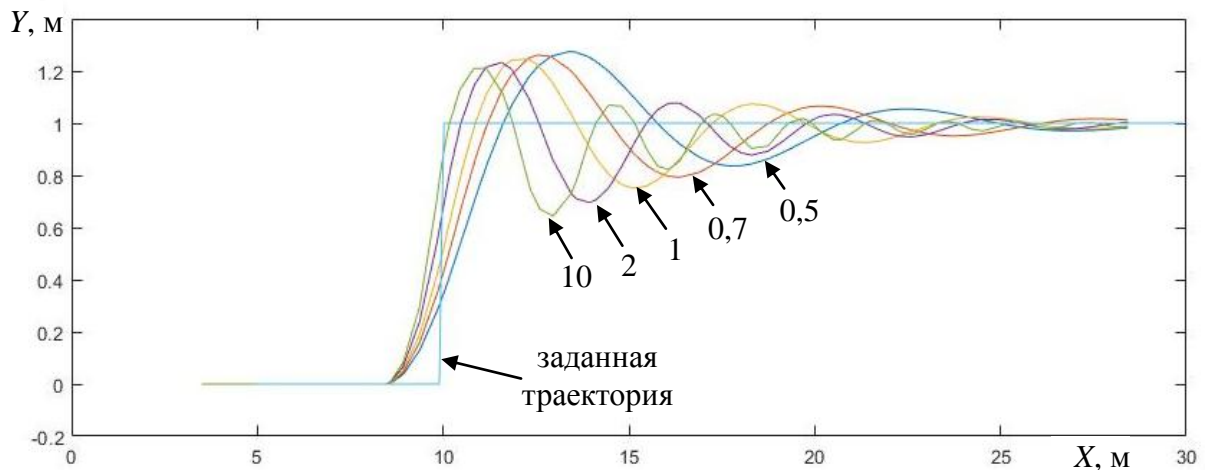


Рисунок 5.3.1 – Траектории движения центральной точки рабочего органа при различных значениях коэффициента усиления k ($L = 9$ м, $K_\delta = 0,5$, $V = 0,5$ м/с)

К фиксированным параметрам были отнесены [189]:

- 1) Тренд реакции грунта на РО.
- 2) Упругие и демпфирующие свойства элементов ходового и рабочего оборудования.

3) Массы элементов ДСМ.

К случайным параметрам были отнесены:

- 1) Параметры неровностей микрорельефа.
- 2) Флюктуации реакции грунта на РО.

В ходе проведения исследований было проанализировано влияние различных параметров математической модели на значение критерия эффективности (рисунок 5.3.2). Наибольшее влияние показали такие факторы, как коэффициент усиления k и скорость машины V . В связи с этим варьируемые параметры были разделены на три подгруппы [189]:

- 1) Конструктивные параметры ДСМ (длина базы, коэффициент базы).
- 2) Эксплуатационные параметры ДСМ (скорость машины).
- 3) Параметры метода управления (коэффициент усиления k).

Диапазон и шаг изменения факторов был принят следующим образом:

- 1) Длина базы $L = 5 \dots 9$ м, шаг 1 м;
- 2) Коэффициент базы $K_b = 0,2 \dots 0,6$, шаг 0,1.
- 3) Скорость машины $V = 0,5 \dots 2,5$ м/с, шаг 0,5 м/с.
- 4) Коэффициент усиления $k = 0 \dots 550$, шаг 0,1...100.

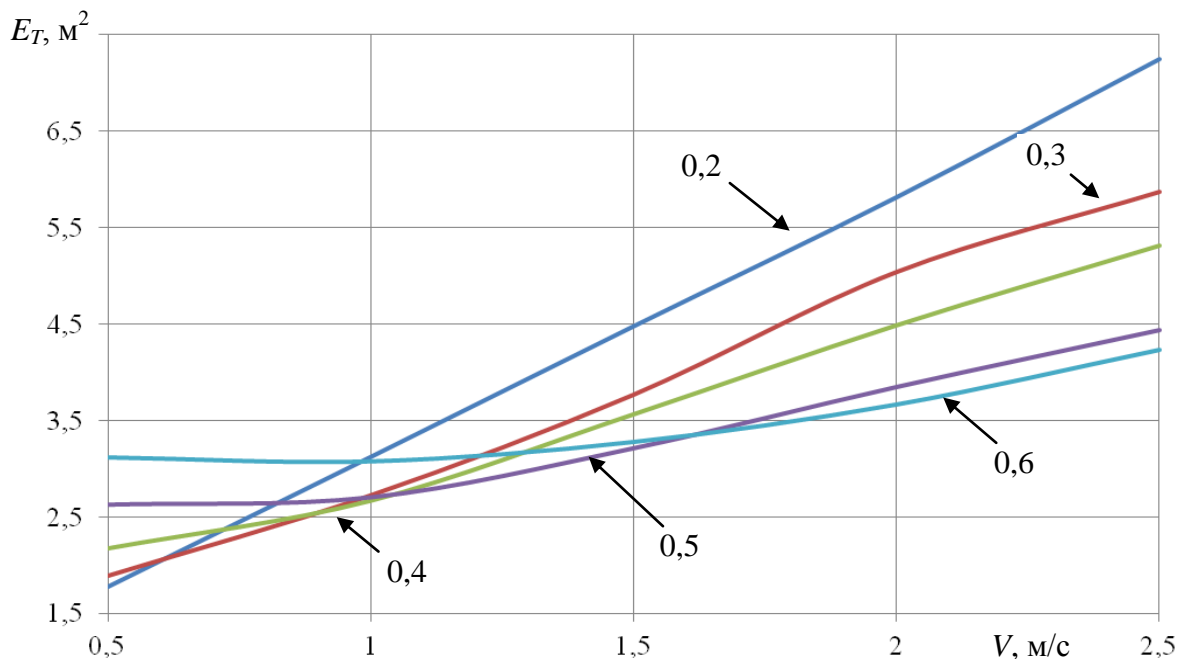


Рисунок 5.3.2 – Влияние скорости V на интегральный критерий E_T при разных значениях коэффициента базы K_b ($L = 5$ м, $k = 10$)

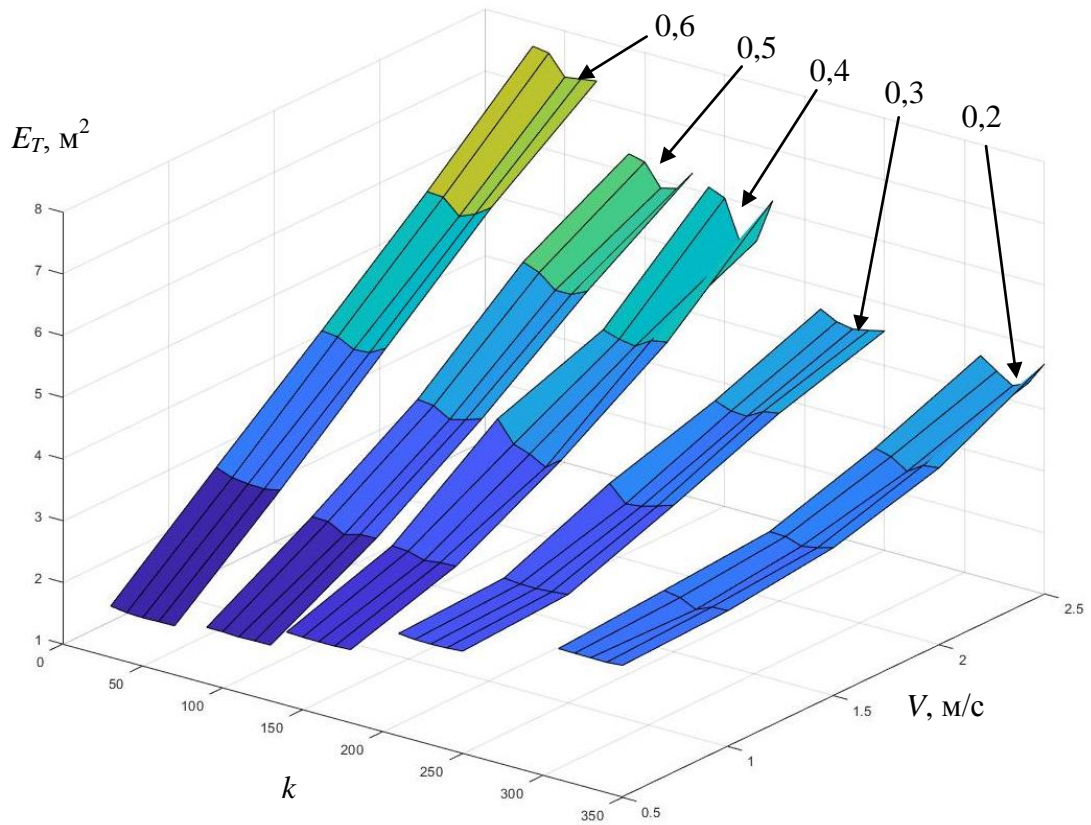


Рисунок 5.3.3 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k и скорости V при различных значениях коэффициента базы ($L = 5$ м)

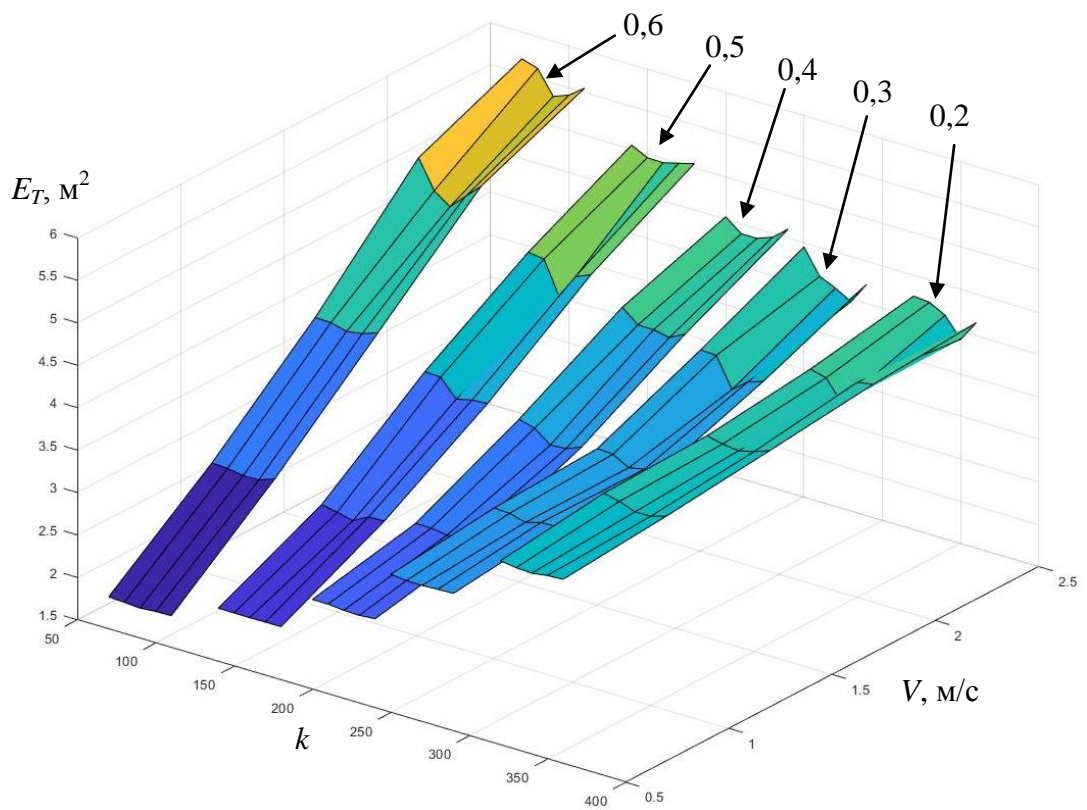


Рисунок 5.3.4 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k и скорости V при различных значениях коэффициента базы ($L = 6$ м)

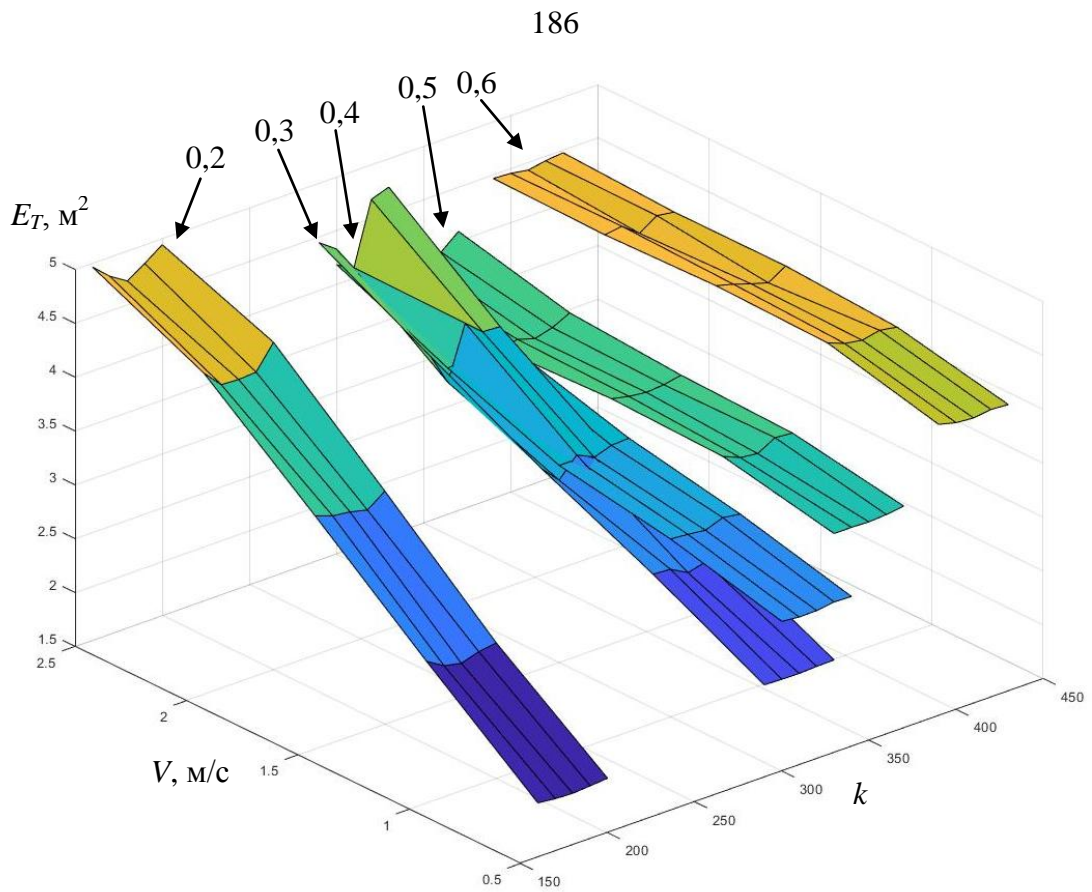


Рисунок 5.3.5 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k и скорости V при различных значениях коэффициента базы ($L = 7$ м)

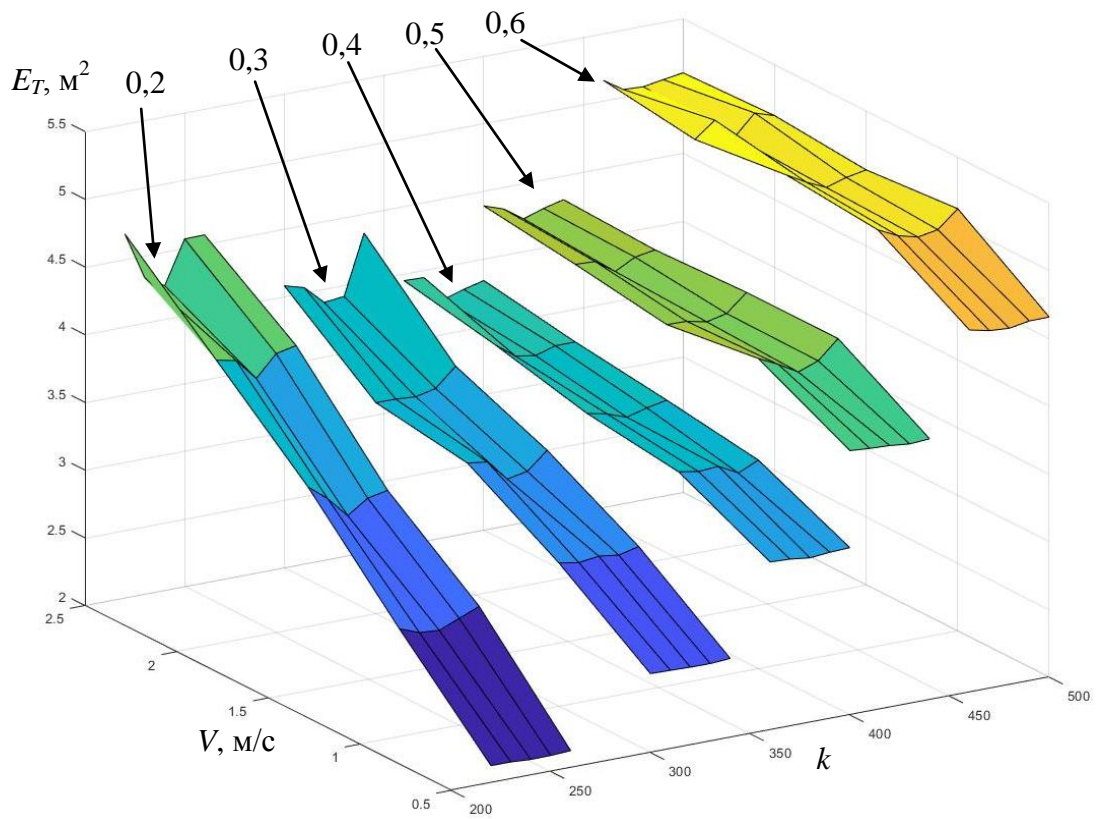


Рисунок 5.3.6 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k и скорости V при различных значениях коэффициента базы ($L = 8$ м)

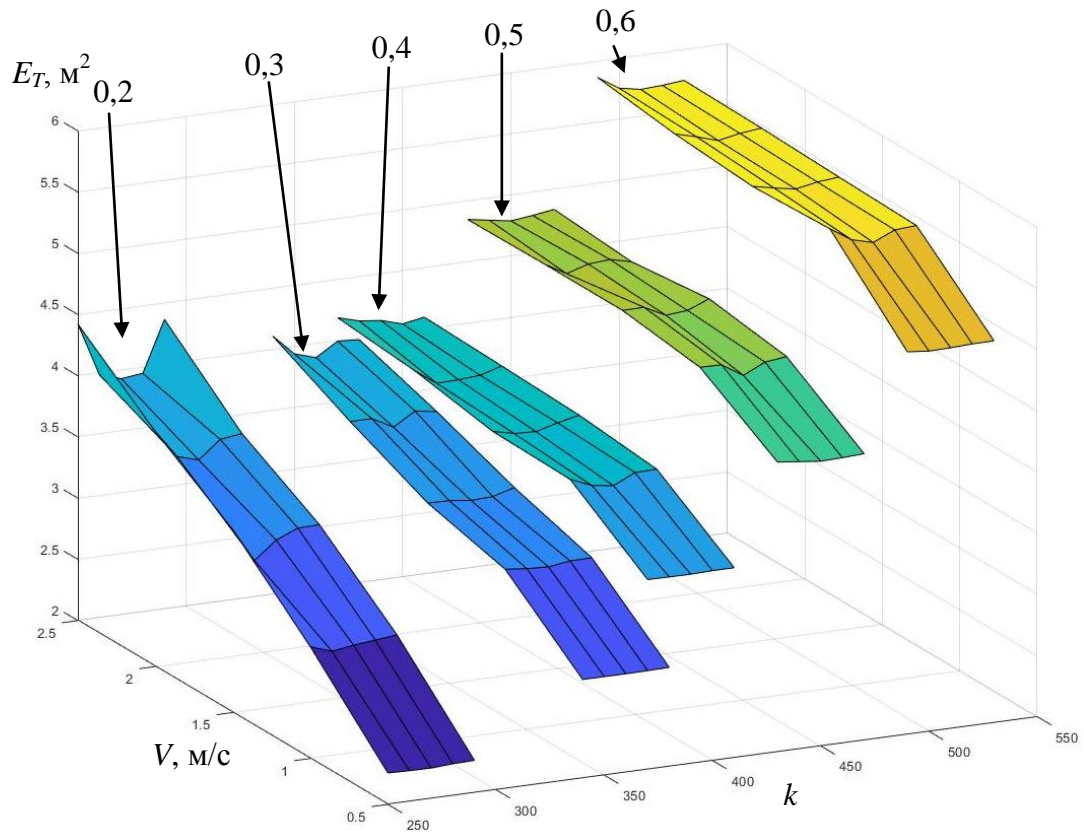


Рисунок 5.3.7 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k и скорости V при различных значениях коэффициента базы ($L = 9$ м)

Результаты исследований были оформлены в виде графиков (комплекса поверхностей) для различных длин базы и разных значений скорости ДСМ (рисунки 5.3.3 – 5.3.7) [189].

Полученные зависимости были аппроксимированы методом наименьших квадратов (описание метода в п. 2.1). Уравнения регрессии приведены в таблице 5.13 [189].

В результате проведенной оптимизации (описание метода оптимизации в п. 2.1) были получены оптимальные значения коэффициента усиления для различных значений длины базы, коэффициента базы, скорости [189].

После анализа результатов оптимизации было установлено, что оптимальное значение коэффициента усиления k оказалось идентичным при различных значениях скорости, т.е. установлено отсутствие зависимости оптимального значения коэффициента усиления k от скорости машины V . Это обусловлено тем,

что в формуле для расчета управляющего воздействия на рулевое управление (4.4.8) уже присутствует параметр скорости. В связи с этим оптимальные значения коэффициента усиления k приведены для двух факторов – коэффициента базы K_0 и длины базы L (таблица 5.3.2) [189].

Таблица 5.13

Уравнения регрессии

L	K_0	Уравнение регрессии	R^2
5	0,2	$E_T = 1,047 - 0,029 \cdot k + 0,0003 \cdot k^2 + 2,867 \cdot V + 0,02776 \cdot V^2 - 0,0028 \cdot k \cdot V$	0,999
	0,3	$E_T = 5,195 - 0,08 \cdot k + 0,000367 \cdot k^2 + 2,144 \cdot V + 0,08 \cdot V^2 - 0,00208 \cdot k \cdot V$	0,995
	0,4	$E_T = 17,02 - 0,1914 \cdot k + 0,0006 \cdot k^2 + 0,8133 \cdot V + 0,3854 \cdot V^2 - 0,00089 \cdot k \cdot V$	0,986
	0,5	$E_T = 16,56 - 0,1235 \cdot k + 0,0003 \cdot k^2 + 0,11 \cdot V + 0,3 \cdot V^2 - 0,000075 \cdot k \cdot V$	0,984
	0,6	$E_T = 101,4 - 0,3838 \cdot k + 0,00037 \cdot k^2 - 1,096 \cdot V + 0,4181 \cdot V^2 - 0,001 \cdot k \cdot V$	0,981
6	0,2	$E_T = 1,341 - 0,034 \cdot k + 0,00036 \cdot k^2 + 2,606 \cdot V - 0,2047 \cdot V^2 - 0,00225 \cdot k \cdot V$	0,994
	0,3	$E_T = 7,959 - 0,082 \cdot k + 0,00025 \cdot k^2 + 1,375 \cdot V + 0,05293 \cdot V^2 - 0,00043 \cdot k \cdot V$	0,993
	0,4	$E_T = 13,47 - 0,1031 \cdot k + 0,00023 \cdot k^2 + 0,3013 \cdot V + 0,1837 \cdot V^2 - 0,0007 \cdot k \cdot V$	0,989
	0,5	$E_T = 24,38 - 0,1595 \cdot k + 0,0003 \cdot k^2 + 0,581 \cdot V + 0,2933 \cdot V^2 - 0,00035 \cdot k \cdot V$	0,957
	0,6	$E_T = 32,28 - 0,1705 \cdot k + 0,00025 \cdot k^2 + 0,6371 \cdot V + 0,0379 \cdot V^2 - 0,00153 \cdot k \cdot V$	0,864
7	0,2	$E_T = 11,46 - 0,1167 \cdot k + 0,0003 \cdot k^2 + 1,997 \cdot V - 0,1893 \cdot V^2 + 0,00026 \cdot k \cdot V$	0,995
	0,3	$E_T = 22,7 - 0,1297 \cdot k + 0,0002 \cdot k^2 - 0,6582 \cdot V + 0,08275 \cdot V^2 + 0,0047 \cdot k \cdot V$	0,977
	0,4	$E_T = 14,89 - 0,07685 \cdot k + 0,00012 \cdot k^2 + 0,45 \cdot V + 0,1453 \cdot V^2 - 0,00091 \cdot k \cdot V$	0,989
	0,5	$E_T = 22,33 - 0,1071 \cdot k + 0,00015 \cdot k^2 - 0,27 \cdot V + 0,01467 \cdot V^2 + 0,00118 \cdot k \cdot V$	0,867
	0,6	$E_T = 17,29 - 0,0765 \cdot k + 0,00011 \cdot k^2 + 0,2567 \cdot V - 0,1156 \cdot V^2 + 0,00063 \cdot k \cdot V$	0,858
8	0,2	$E_T = 12,58 - 0,1251 \cdot k + 0,00035 \cdot k^2 + 1,552 \cdot V - 0,099 \cdot V^2 - 0,00032 \cdot k \cdot V$	0,992
	0,3	$E_T = 32,52 - 0,1874 \cdot k + 0,0003 \cdot k^2 + 0,047 \cdot V - 0,0375 \cdot V^2 - 0,0024 \cdot k \cdot V$	0,971
	0,4	$E_T = 22,79 - 0,1052 \cdot k + 0,00014 \cdot k^2 + 1,131 \cdot V - 0,093 \cdot V^2 - 0,00147 \cdot k \cdot V$	0,956
	0,5	$E_T = 40,71 - 0,177 \cdot k + 0,0002 \cdot k^2 + 0,782 \cdot V - 0,1233 \cdot V^2 - 0,0006 \cdot k \cdot V$	0,826
	0,6	$E_T = 41,52 - 0,1553 \cdot k + 0,0002 \cdot k^2 + 0,9543 \cdot V - 0,22 \cdot V^2 - 0,00022 \cdot k \cdot V$	0,884
9	0,2	$E_T = 33,96 - 0,242 \cdot k + 0,00045 \cdot k^2 + 1,779 \cdot V - 0,19 \cdot V^2 - 0,001 \cdot k \cdot V$	0,983
	0,3	$E_T = 17,68 - 0,086 \cdot k + 0,00012 \cdot k^2 + 1,294 \cdot V - 0,1414 \cdot V^2 - 0,00086 \cdot k \cdot V$	0,978
	0,4	$E_T = 23,99 - 0,11 \cdot k + 0,00014 \cdot k^2 + 1,31 \cdot V - 0,1877 \cdot V^2 - 0,0013 \cdot k \cdot V$	0,907
	0,5	$E_T = 27,5 - 0,104 \cdot k + 0,0001 \cdot k^2 + 0,9177 \cdot V - 0,2472 \cdot V^2 + 0,00006 \cdot k \cdot V$	0,918
	0,6	$E_T = 45,8 - 0,162 \cdot k + 0,00016 \cdot k^2 + 1,702 \cdot V - 0,2933 \cdot V^2 - 0,0011 \cdot k \cdot V$	0,883

График полученных оптимальных значений коэффициента усиления представлен на рисунок 5.3.8 [189].

Таблица 5.14

Оптимальные значения коэффициента усиления k

$L \backslash K_{\delta}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
5	54,8	111,9	168,5	228,5	335,1
6	92,4	157,3	224,7	266,8	339,2
7	183,9	313,4	326,8	348,7	406,3
8	232,6	327,1	381,9	425,2	485,7
9	274,7	362,3	393,8	454,7	501,8

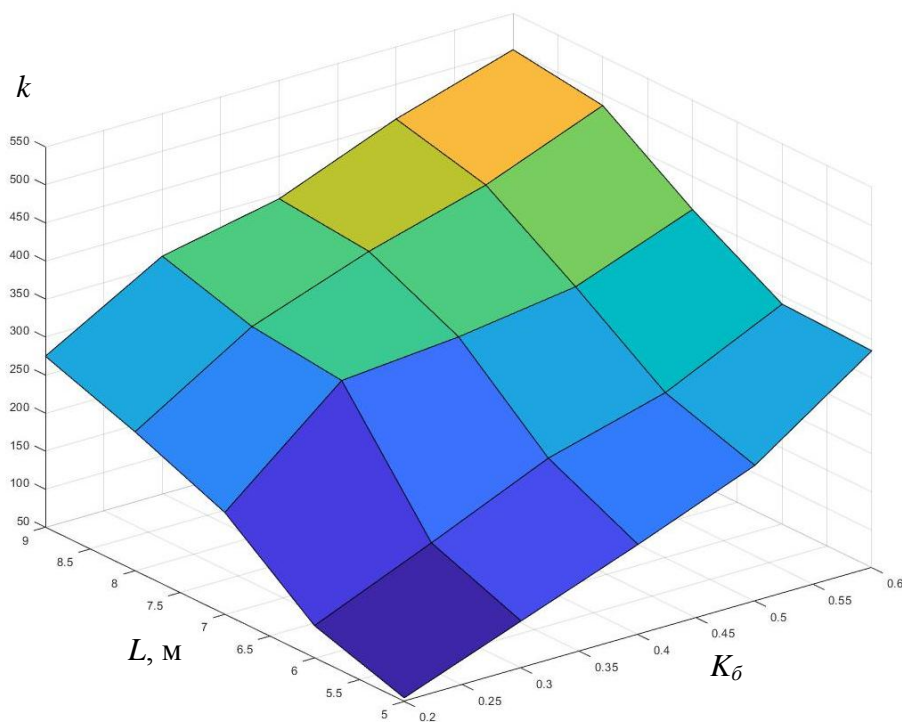


Рисунок 5.3.8 – Зависимость оптимального значения коэффициента усиления k при различных значениях длины базы и коэффициента базы

Полученная зависимость оптимального значения коэффициента усиления от длины базы и коэффициента базы была аппроксимирована следующим уравнением [189]

$$k = -349,9 + 582,3 \cdot K_{\delta} + 58,98 \cdot L. \quad (5.3.1)$$

Таким образом, в результате проведенных исследований метод Стэнли был адаптирован для управления автогрейдером, зависимость оптимального значения коэффициента усиления от длины базы и коэффициента базы представлена формулой (5.3.1). Коэффициент усиления задается при настройке СУ и остается фиксированным при любой скорости машины [189].

5.4. Теоретические исследования копирного метода управления

Для разработки универсального метода управления ДСМ необходимо было учесть основные конструктивные параметры, влияющие на движение ДСМ по заданной траектории – длина базы L и коэффициент базы K_b . Т.к. в отличие от транспортного средства, при движении автогрейдера наиболее значимой точкой является центральная точка РО, т.к. необходимо обеспечить именно движение РО по заданной траектории, а траектории движения колес отходят на второй план.

Проведенные исследования методов «чистое преследование» и Стэнли показали, что важным фактором, влияющим на точность движения ДСМ по заданной траектории, является скорость V поступательного движения ДСМ [192].

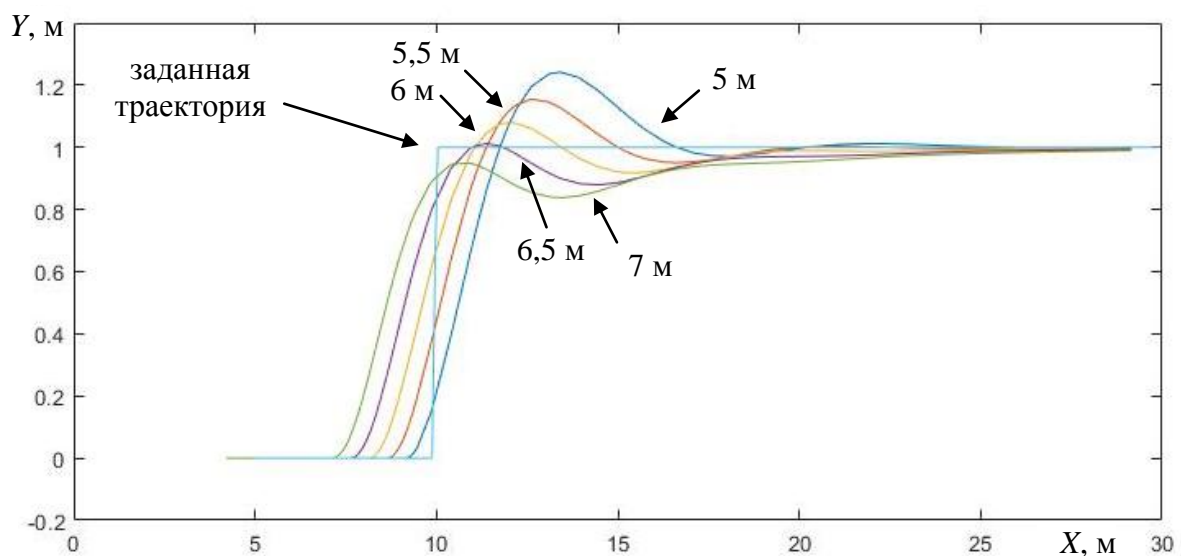


Рисунок 5.4.1 – Траектории движения центральной точки рабочего орана при различных значениях выноса точки копирования L_0 ($L = 6$ м, $K_b = 0,3$, $V = 0,5$ м/с, $k_y = 2$)

При исследованиях на вход математической модели подавалось ступенчатое воздействие – изменение заданной траектории движения на 1 метр (см. рисунок 5.4.1) [165,192].

В ходе проведения исследований было проанализировано влияние различных параметров математической модели на значение критерия эффективности (рисунок 5.4.2). Наибольшее влияние показали такие факторы, как вынос точки копирования L_0 , коэффициент усиления k_y и скорость машины V . Согласно техническим характеристикам, большинство современных автогрейдеров во время рабочего цикла развивают скорость до 6-8 км/ч. В эксперименте скорость изменялась в пределах от 0,5 до 2,5 м/с, что соответствует 1,8 и 9 км/ч [192].

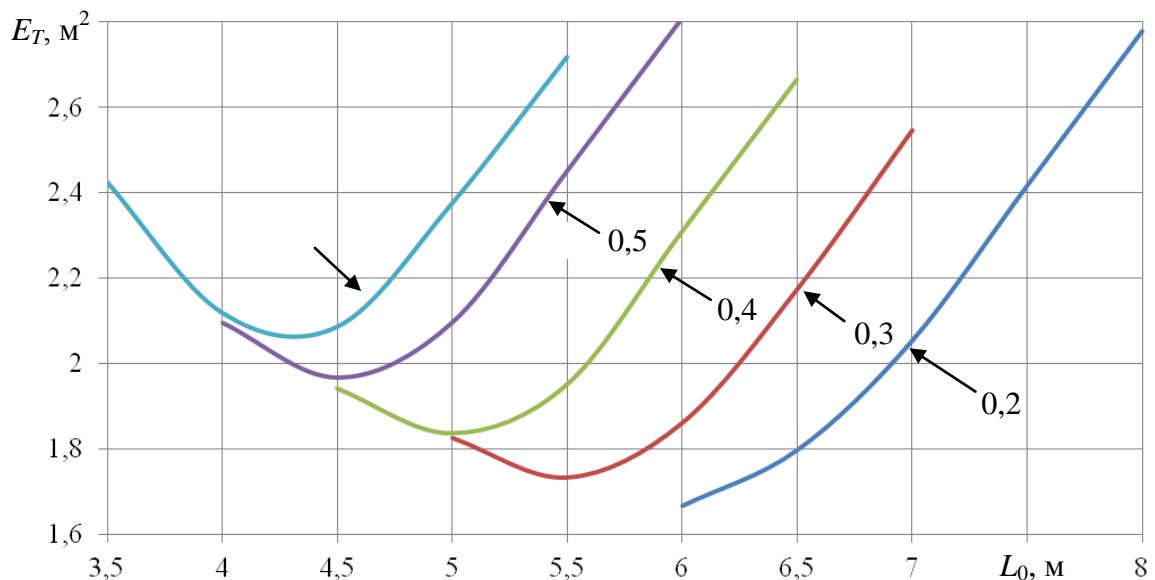


Рисунок 5.4.2 – Влияние выноса точки копирования L_0 на интегральный критерий E_T при разных значениях коэффициента базы K_b ($L = 6$ м, $V = 0,5$ м/с, $k = 1,5$)

Варьируемые параметры при исследовании копирного метода управления были разделены на три подгруппы [192]:

- 1) Конструктивные параметры ДСМ (длина базы, коэффициент базы).
- 2) Эксплуатационные параметры ДСМ (скорость машины).
- 3) Параметры метода управления (вынос точки копирования, коэффициент усиления).

Диапазон изменения факторов был принят следующим образом:

- 1) Длина базы ДСМ $L = 5 \dots 9$ м;
- 2) Коэффициент базы $K_\delta = 0,2 \dots 0,6$
- 3) Скорость ДСМ $V = 0,5 \dots 2,5$ м/с;
- 4) Коэффициент усиления СУ $k_Y = 0,5-60$;
- 5) Вынос точки копирования $L_0 = 3 \dots 15$ м.

Помимо интегрального критерия E_T в качестве ограничения при оптимизации был выбран второй критерий – перерегулирование переходного процесса СУ (рисунок 5.4.3) [108,165,240]. В данной работе к СУ предъявлялось требование по перерегулированию переходного процесса: $\sigma \leq 10\%$ [192].

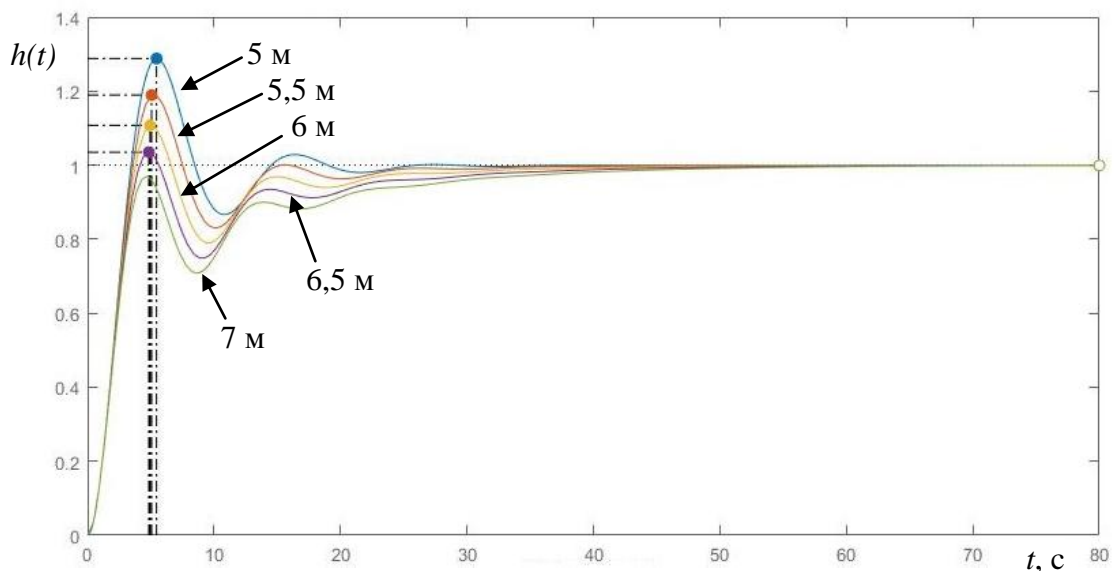


Рисунок 5.4.3 – Переходная характеристика при различных значениях выноса точки копирования L_0 ($K_\delta = 0,3$, $L = 6$ м, $V = 0,5$ м/с, $k = 1,5$)

Полученные результаты были оформлены графически в виде комплекса поверхностей для различных длин базы и разных значений скорости ДСМ (рисунки 5.4.4 – 5.4.53) [192].

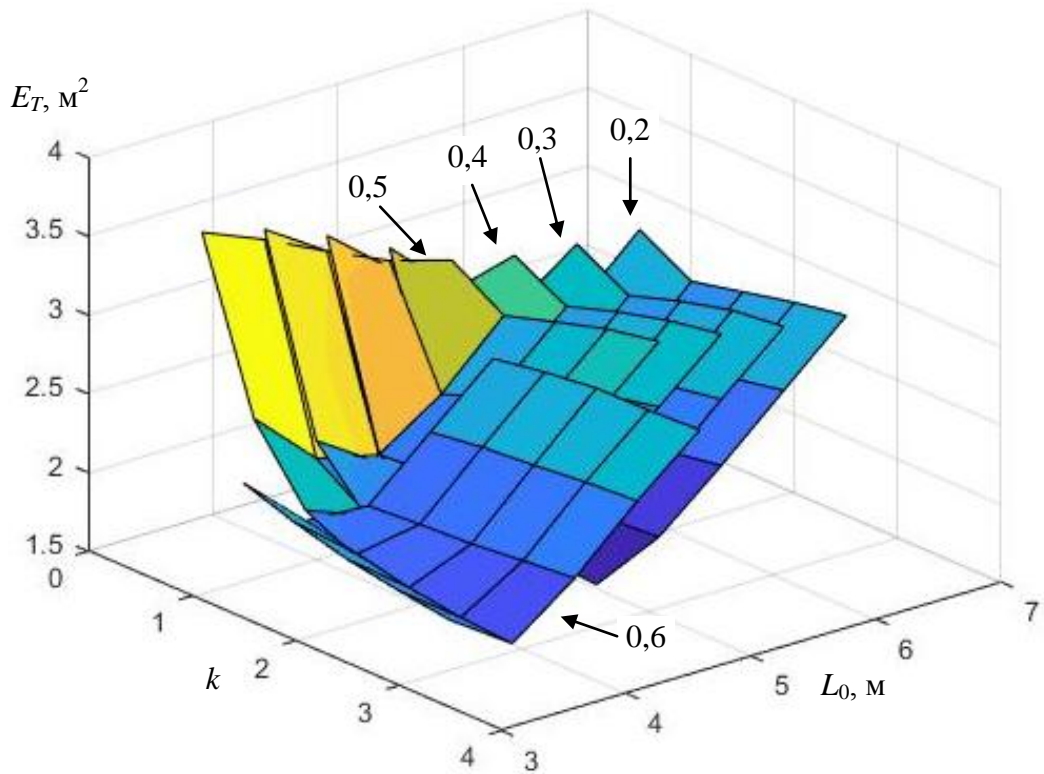


Рисунок 5.4.4 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 5$ м, $V = 0,5$ м/с)

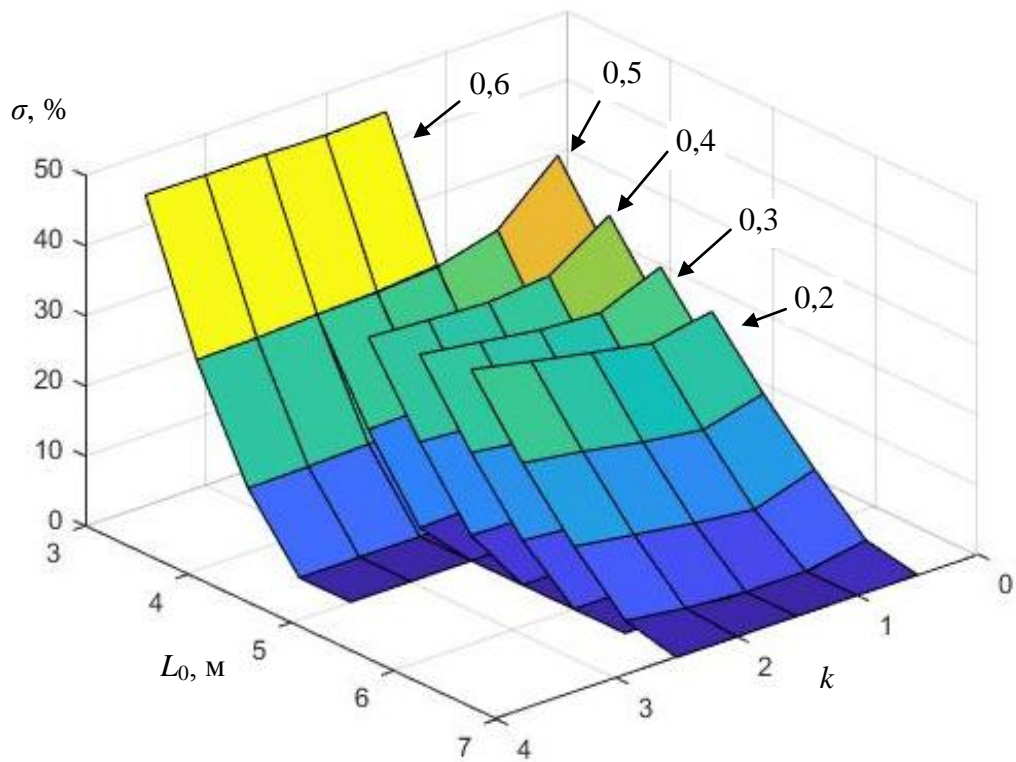


Рисунок 5.4.5 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 5$ м, $V = 0,5$ м/с)

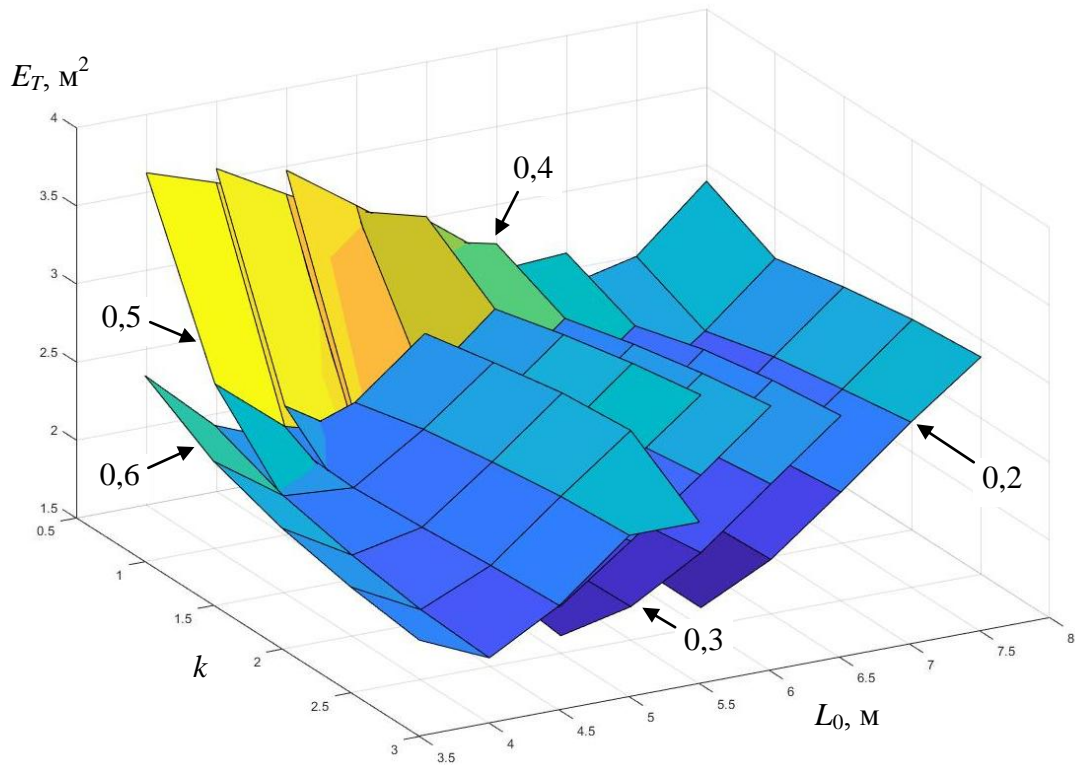


Рисунок 5.4.6 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 6$ м, $V = 0,5$ м/с)

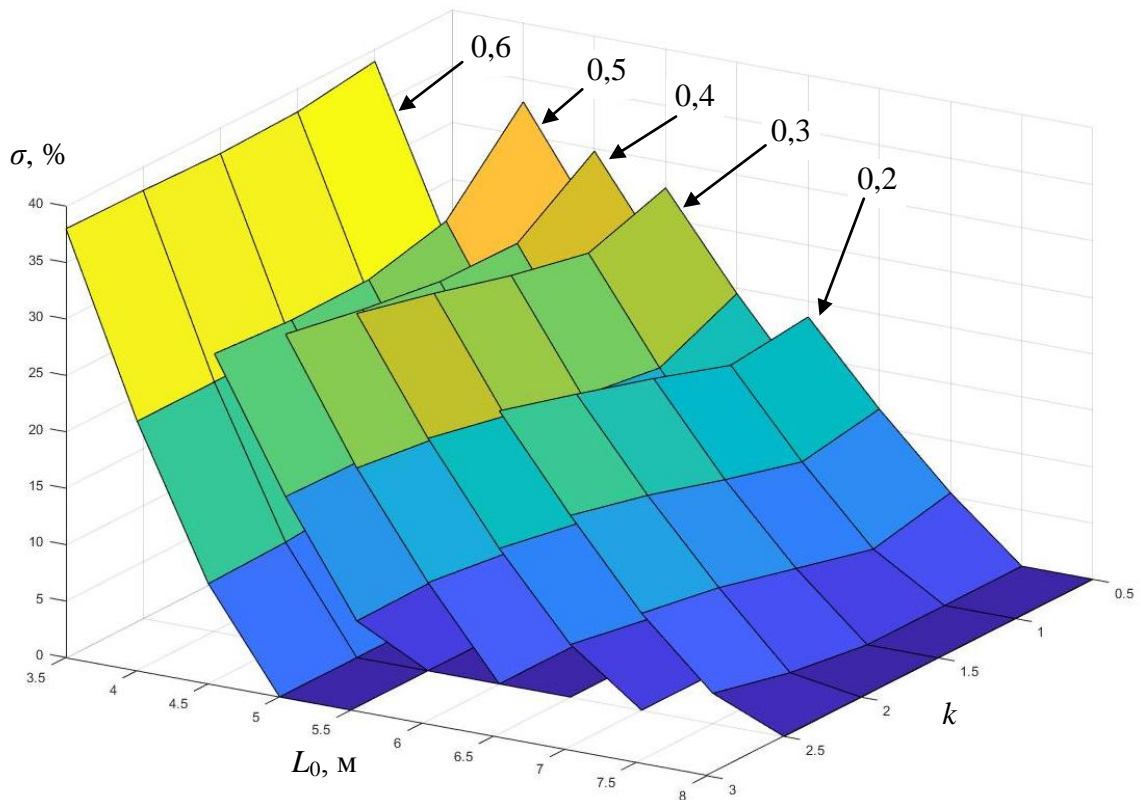


Рисунок 5.4.7 – Зависимости перегулирования σ от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 6$ м, $V = 0,5$ м/с)

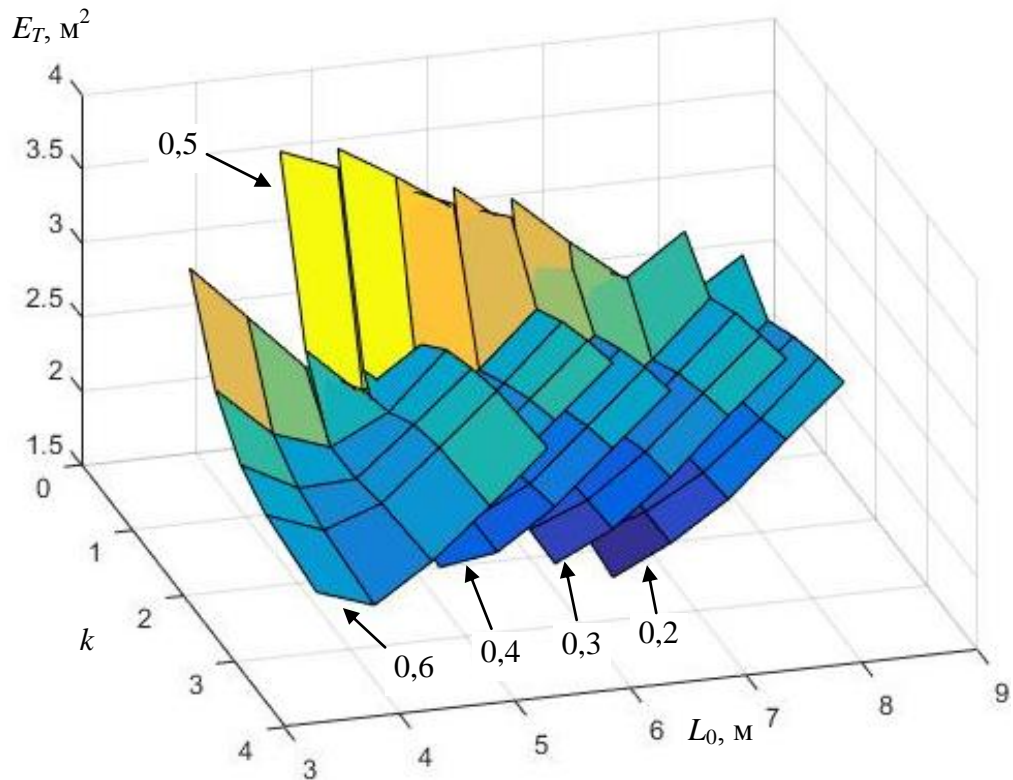


Рисунок 5.4.8 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_V и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 7$ м, $V = 0,5$ м/с)

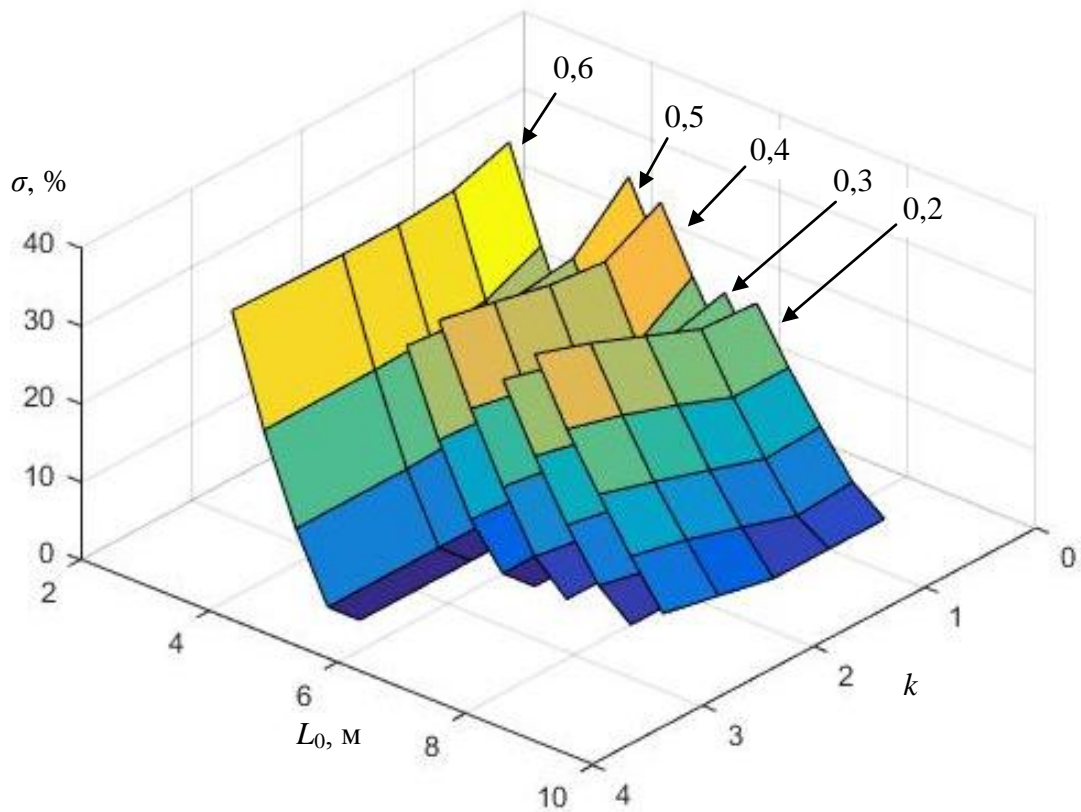


Рисунок 5.4.9 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_V и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 7$ м, $V = 0,5$ м/с)

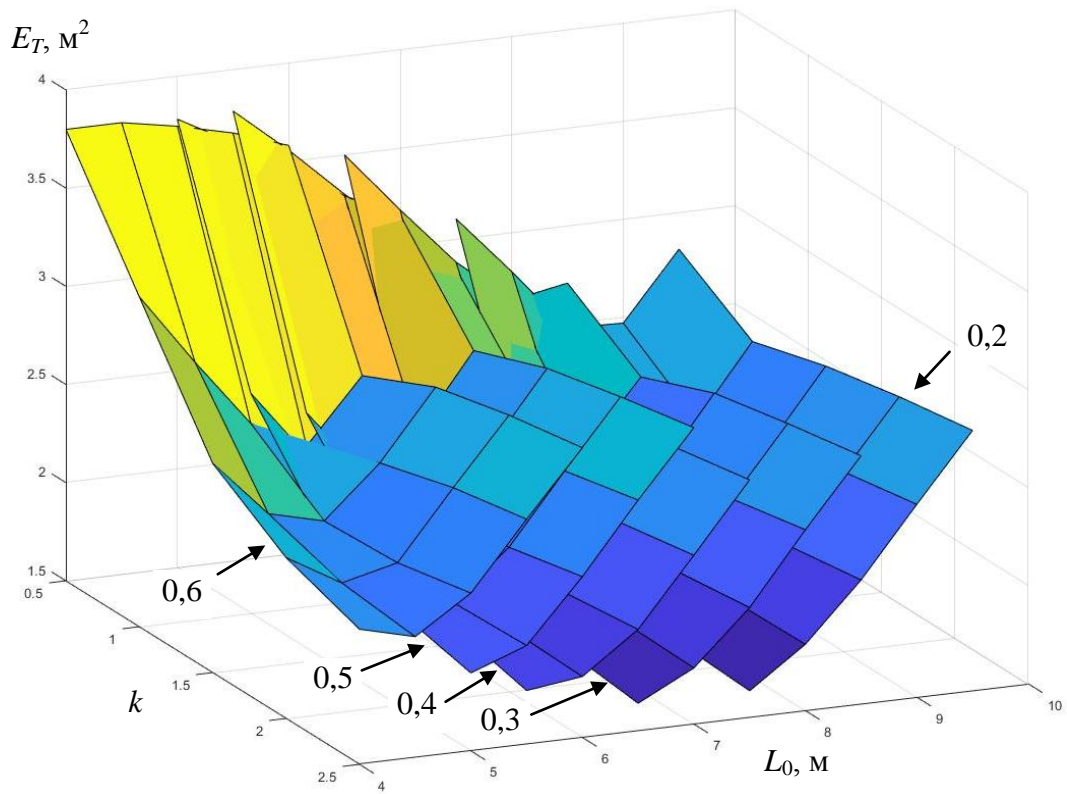


Рисунок 5.4.10 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 8$ м, $V = 0,5$ м/с)

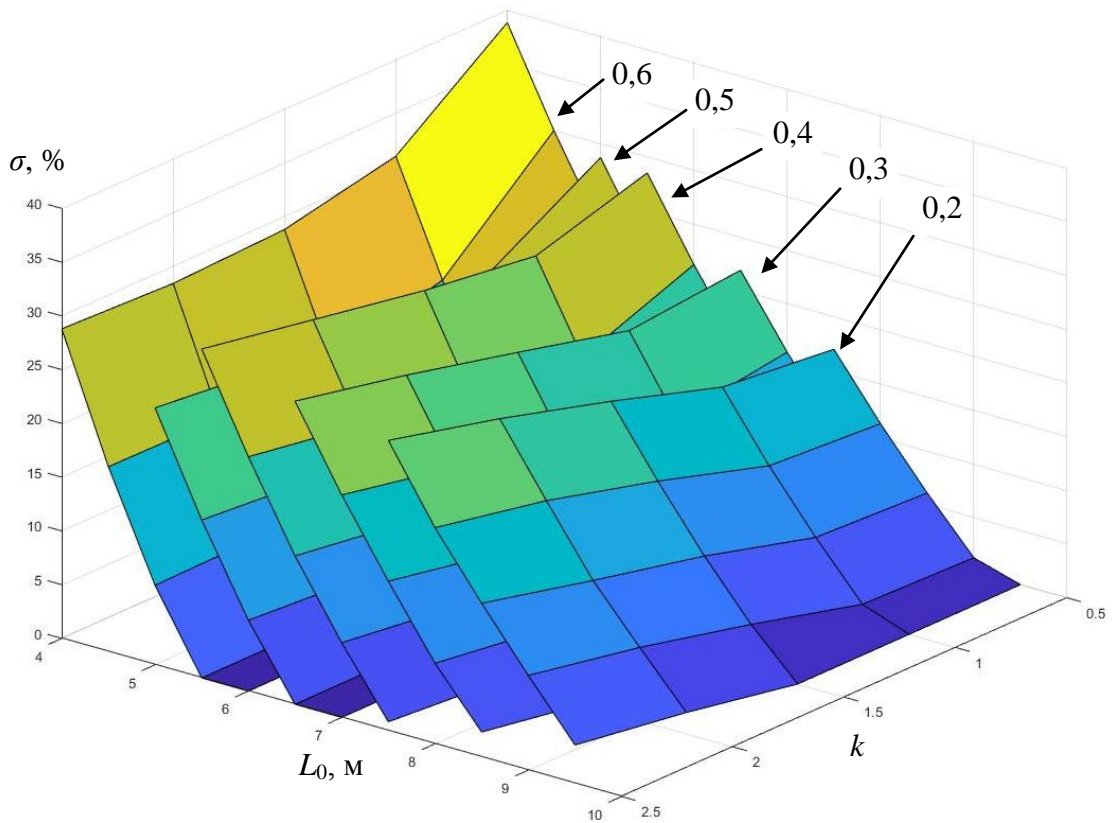


Рисунок 5.4.11 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 8$ м, $V = 0,5$ м/с)

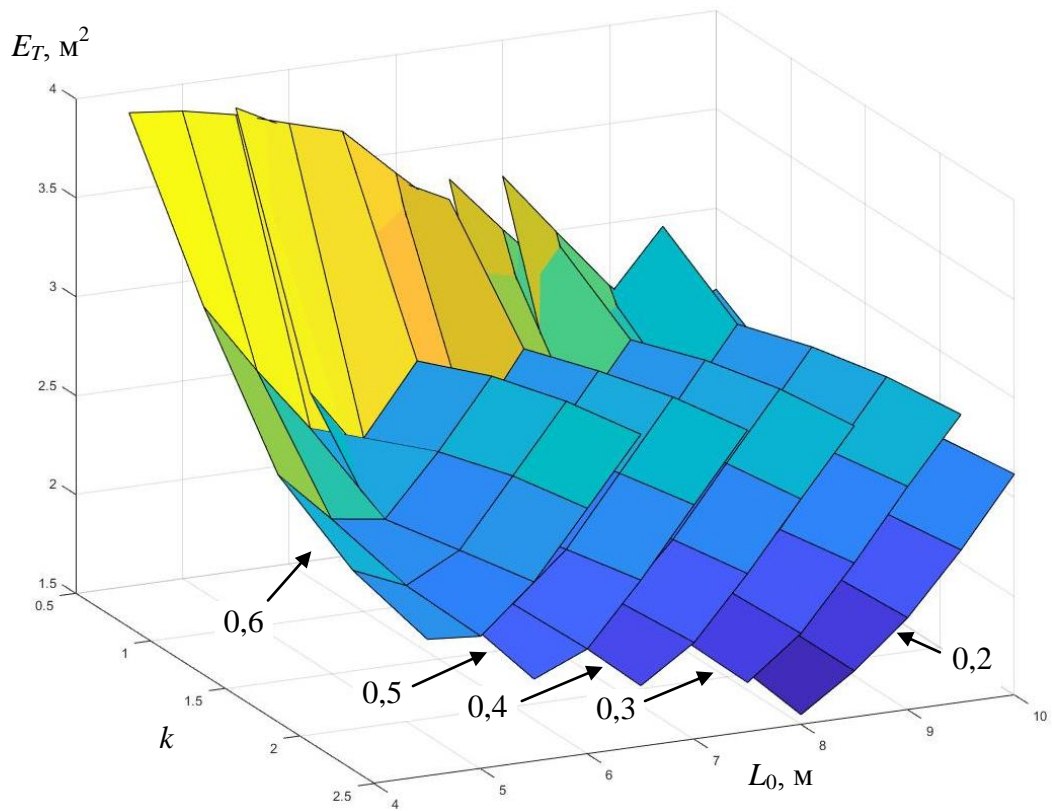


Рисунок 5.4.12 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_V и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 9$ м, $V = 0,5$ м/с)

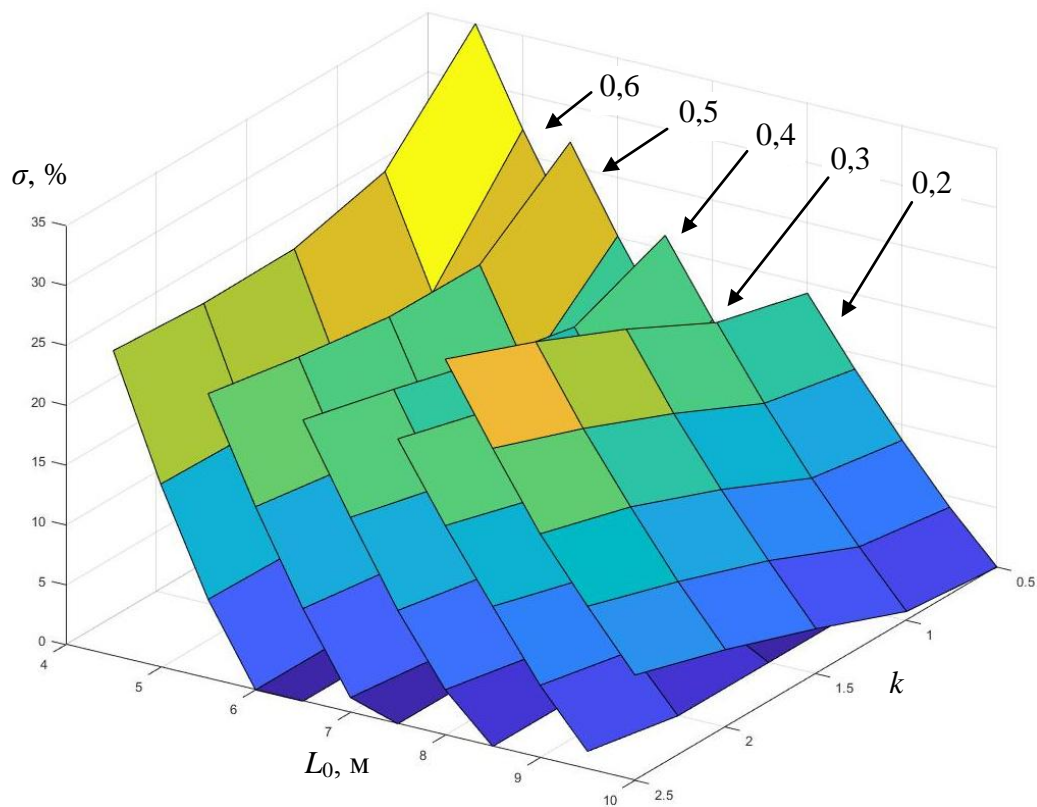


Рисунок 5.4.13 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 9$ м, $V = 0,5$ м/с)

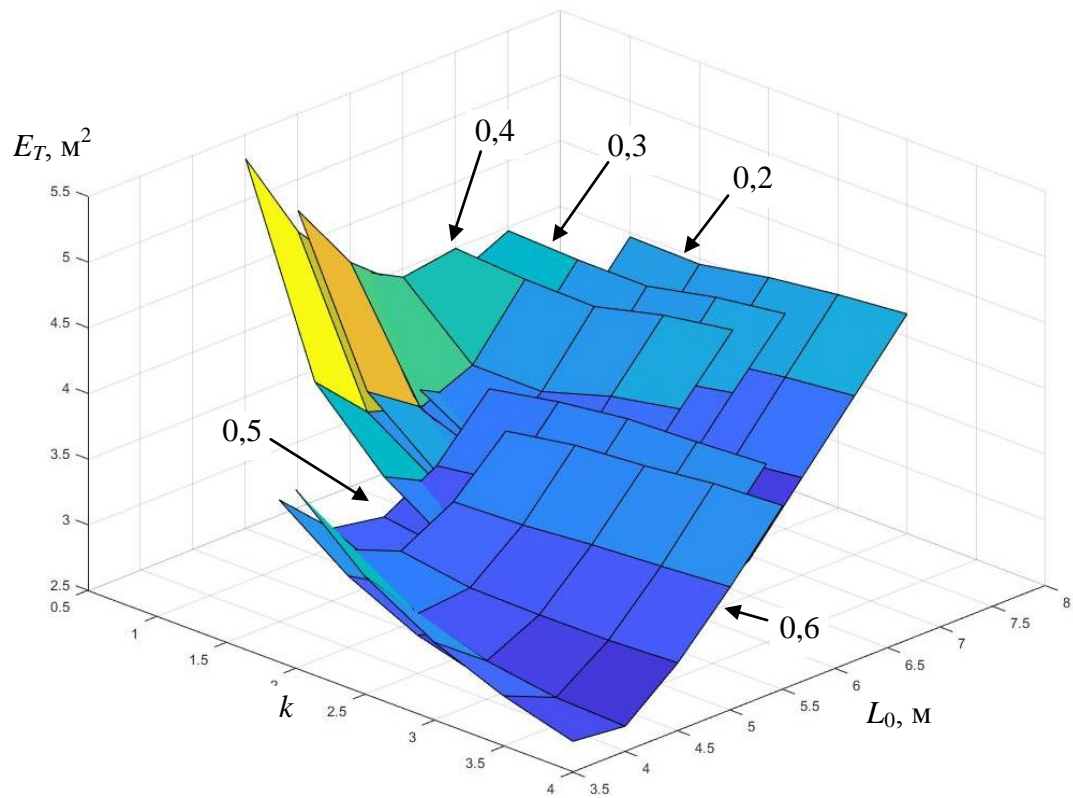


Рисунок 5.4.14 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_U и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 5$ м, $V = 1$ м/с)

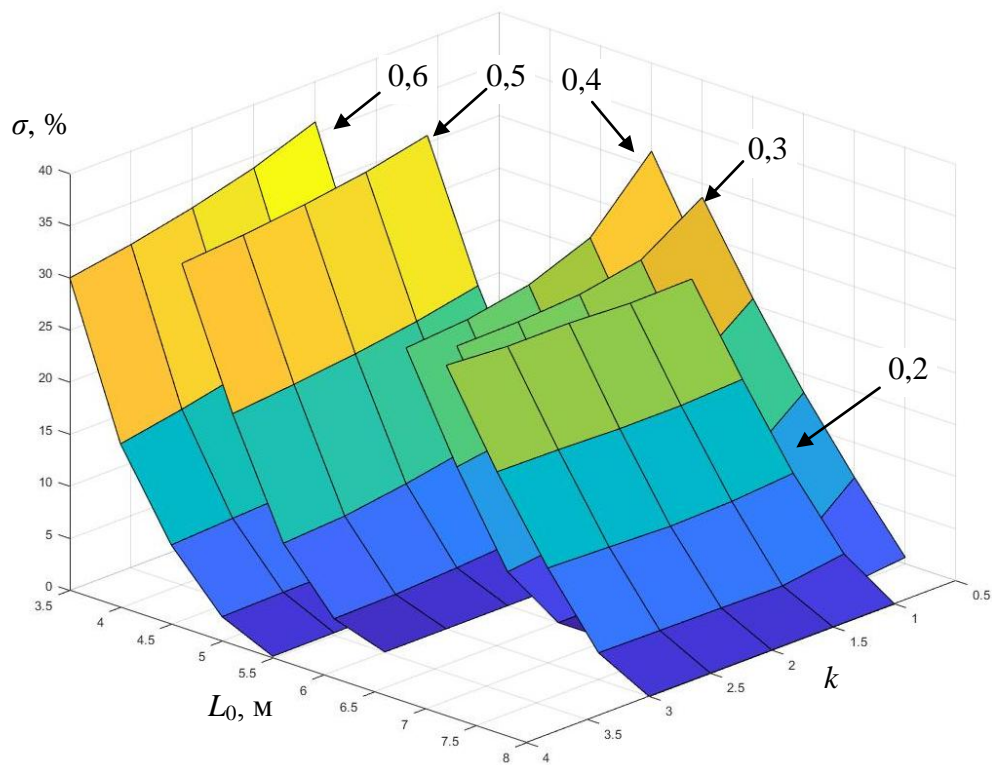


Рисунок 5.4.15 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_U и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 5$ м, $V = 1$ м/с)

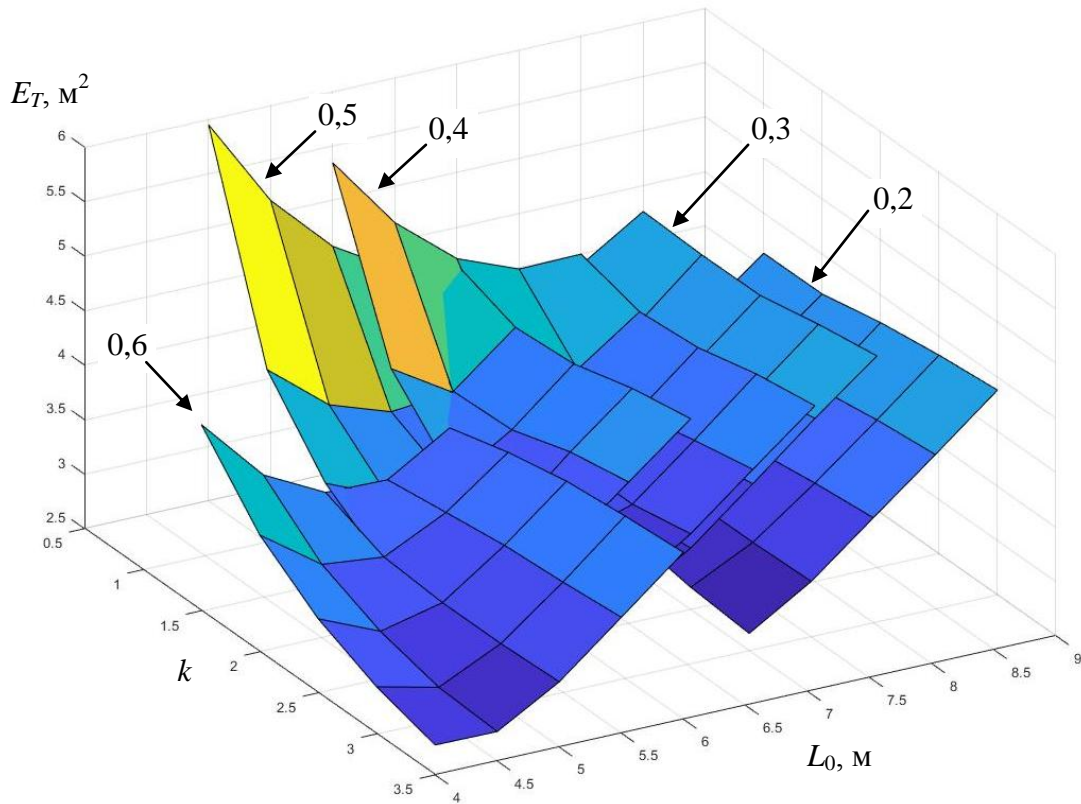


Рисунок 5.4.16 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_δ ($L = 6$ м, $V = 1$ м/с)

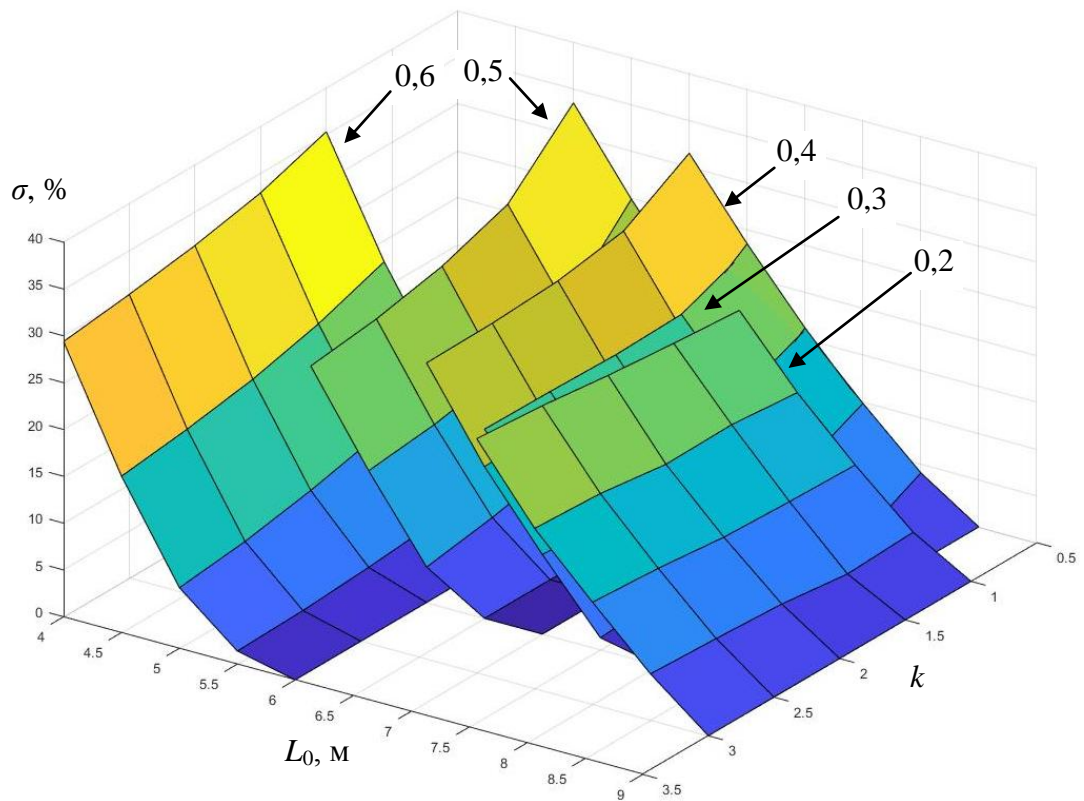


Рисунок 5.4.17 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_δ ($L = 6$ м, $V = 1$ м/с)

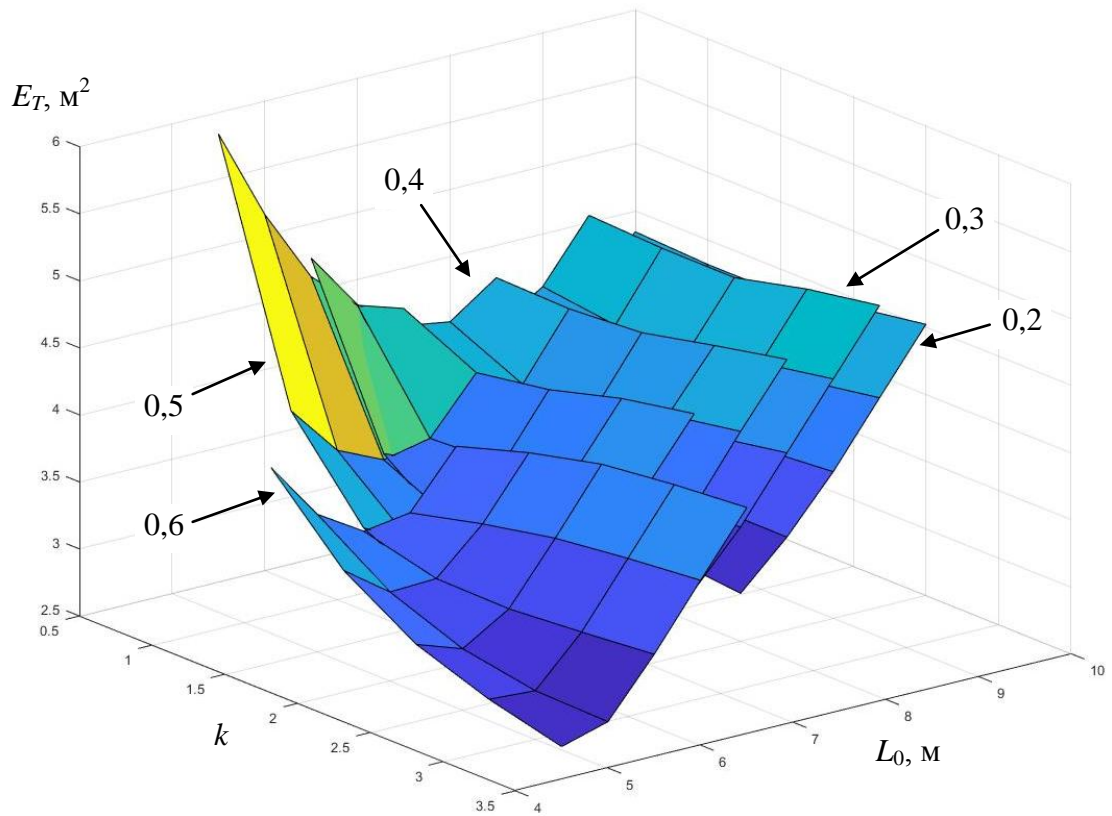


Рисунок 5.4.18 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_β ($L = 7$ м, $V = 1$ м/с)

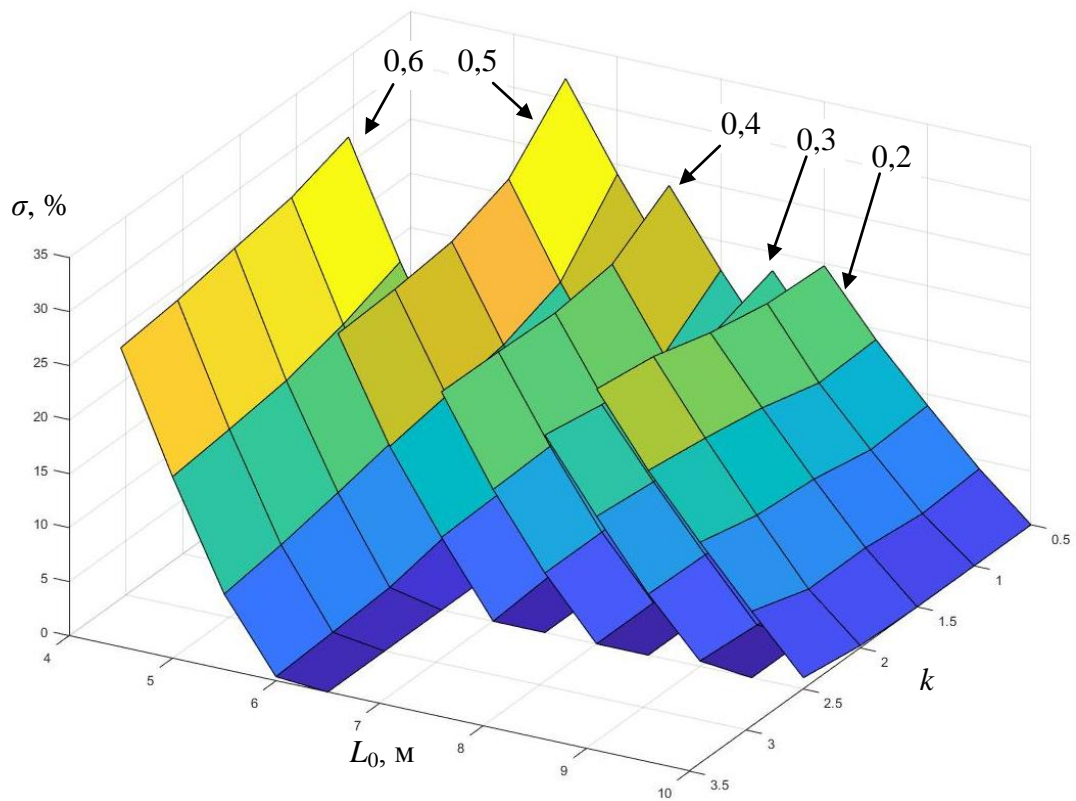


Рисунок 5.4.19 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_β ($L = 7$ м, $V = 1$ м/с)

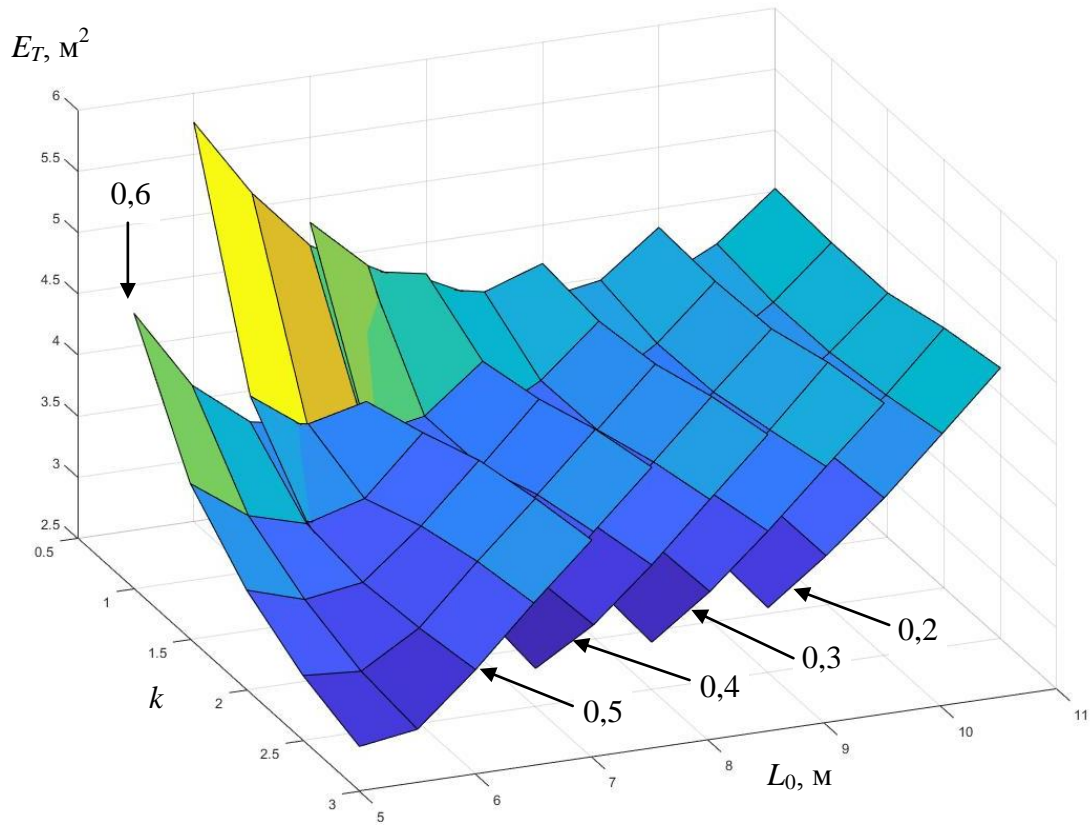


Рисунок 5.4.20 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 8$ м, $V = 1$ м/с)

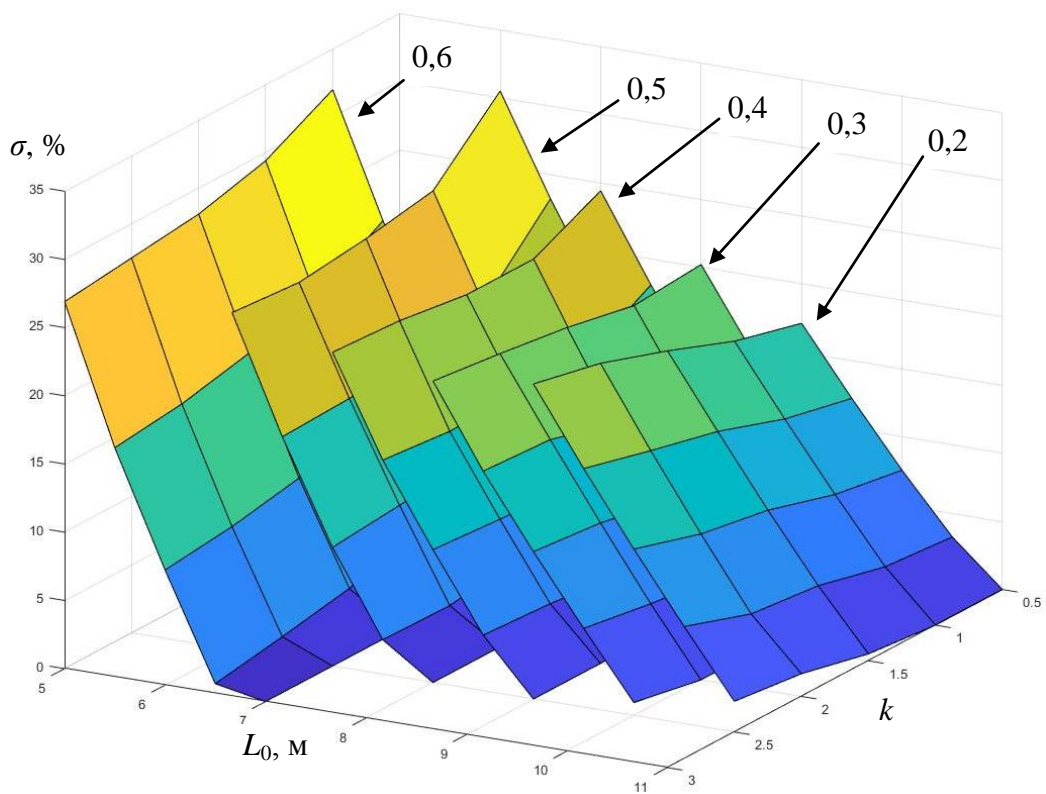


Рисунок 5.4.21 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 8$ м, $V = 1$ м/с)

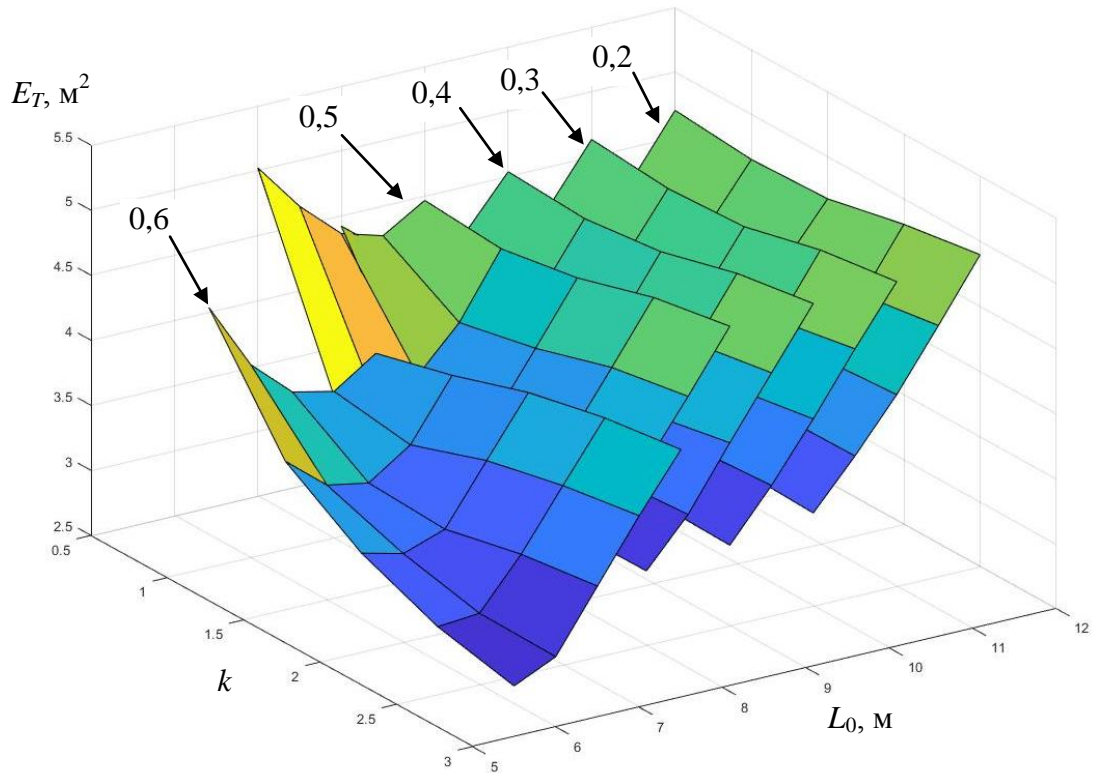


Рисунок 5.4.22 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_U и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_β ($L = 9$ м, $V = 1$ м/с)

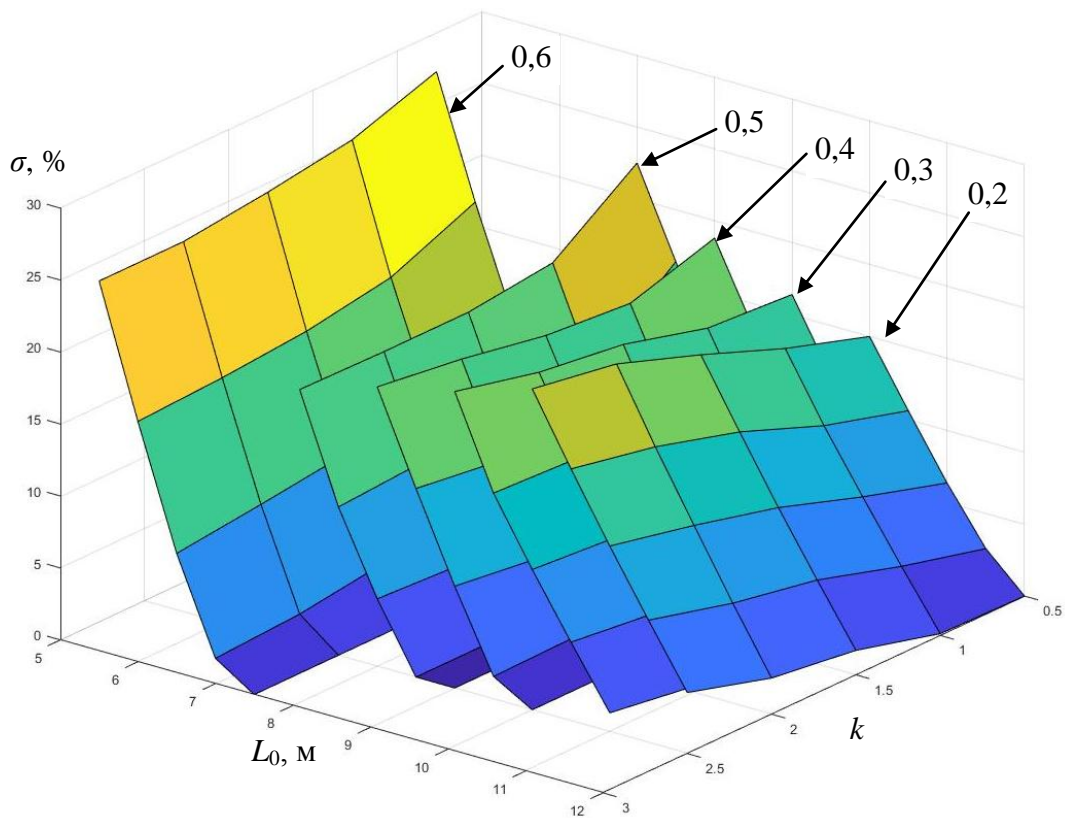


Рисунок 5.4.23 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_U и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_β ($L = 9$ м, $V = 1$ м/с)

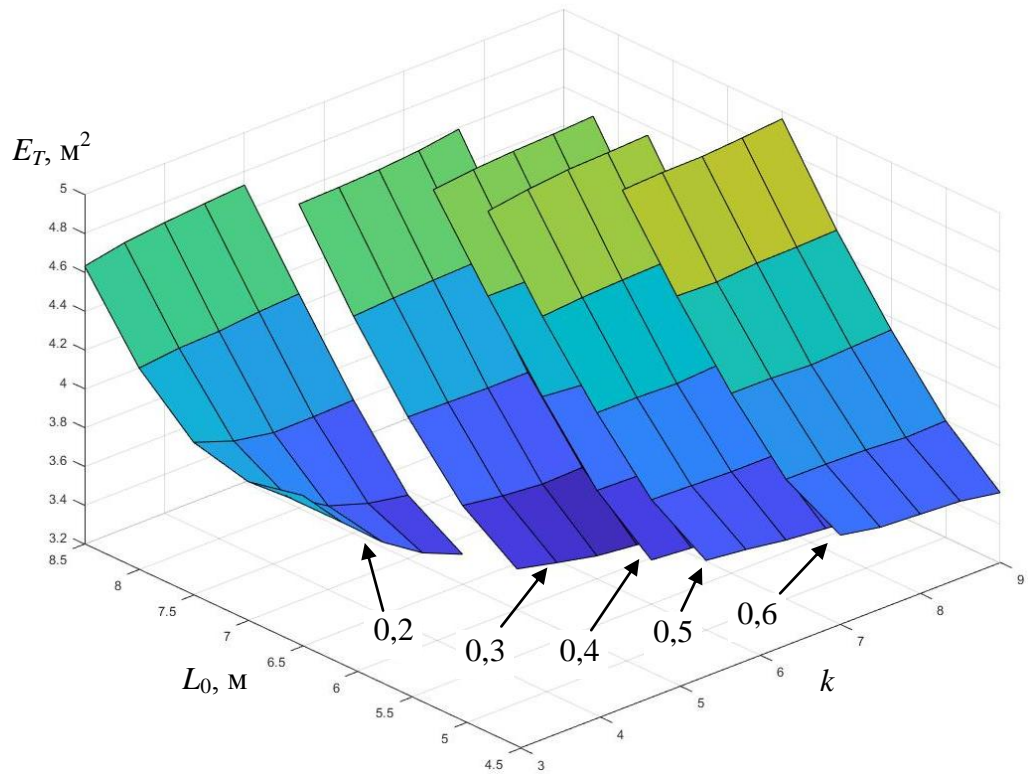


Рисунок 5.4.24 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 5$ м, $V = 1,5$ м/с)

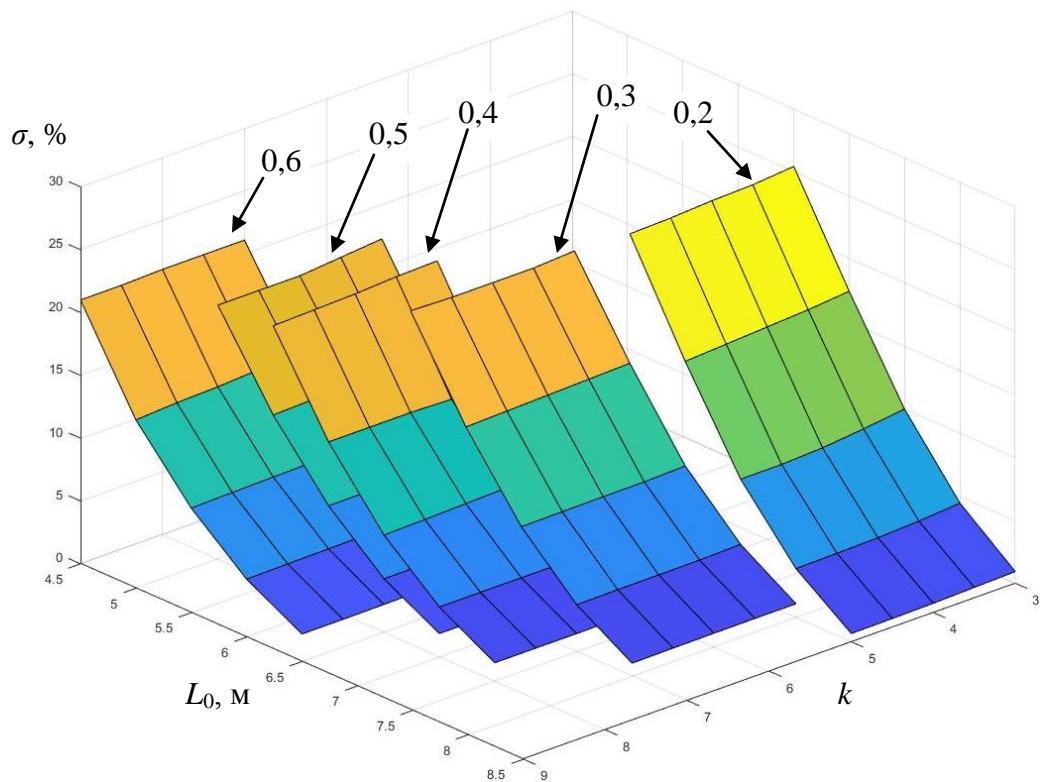


Рисунок 5.4.25 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 5$ м, $V = 1,5$ м/с)

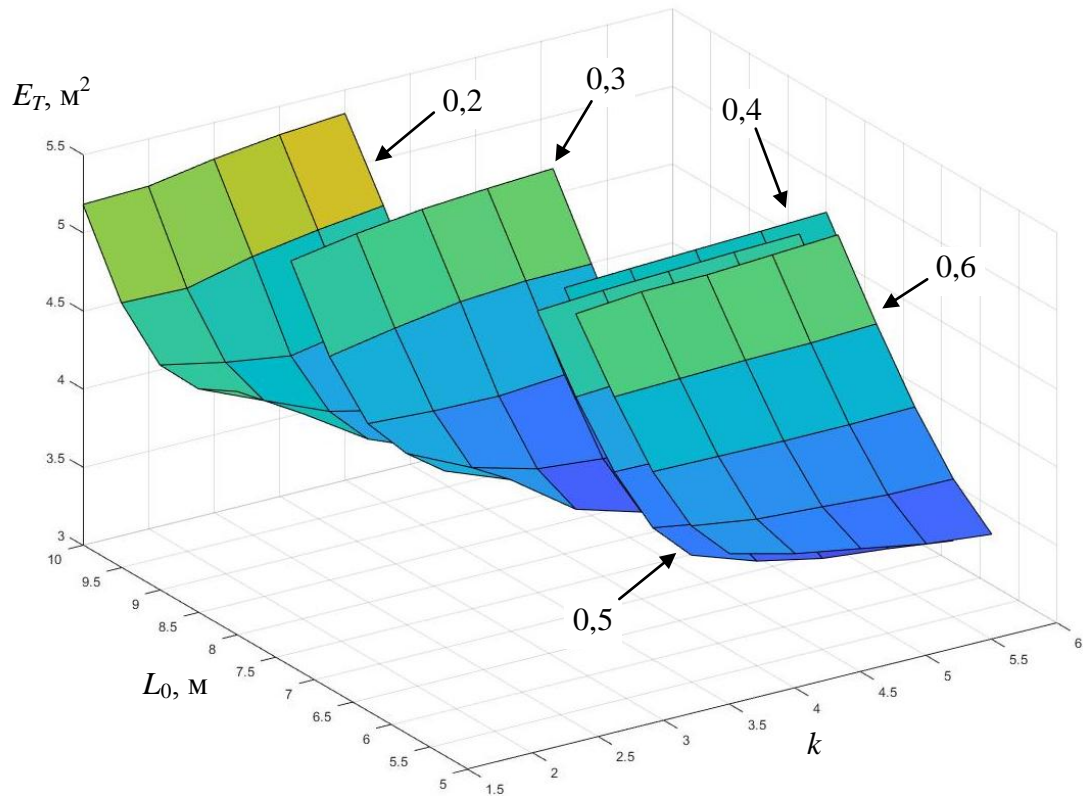


Рисунок 5.4.26 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 6$ м, $V = 1,5$ м/с)

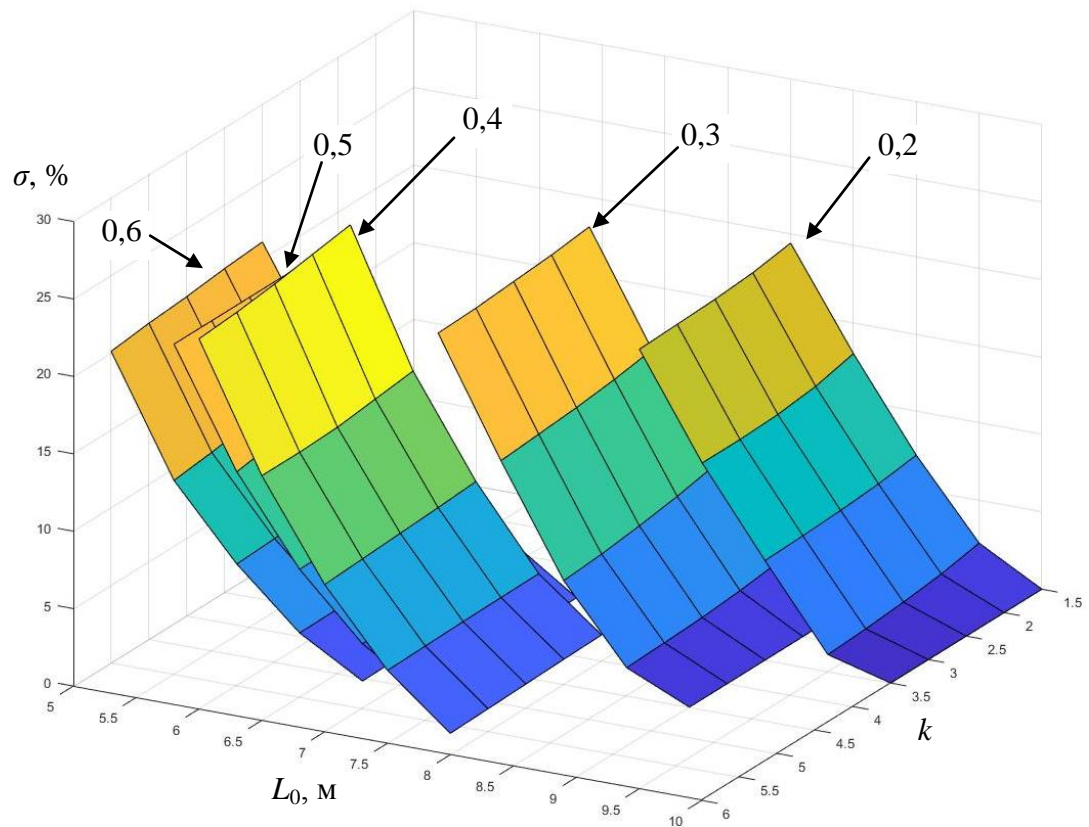


Рисунок 5.4.27 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 6$ м, $V = 1,5$ м/с)

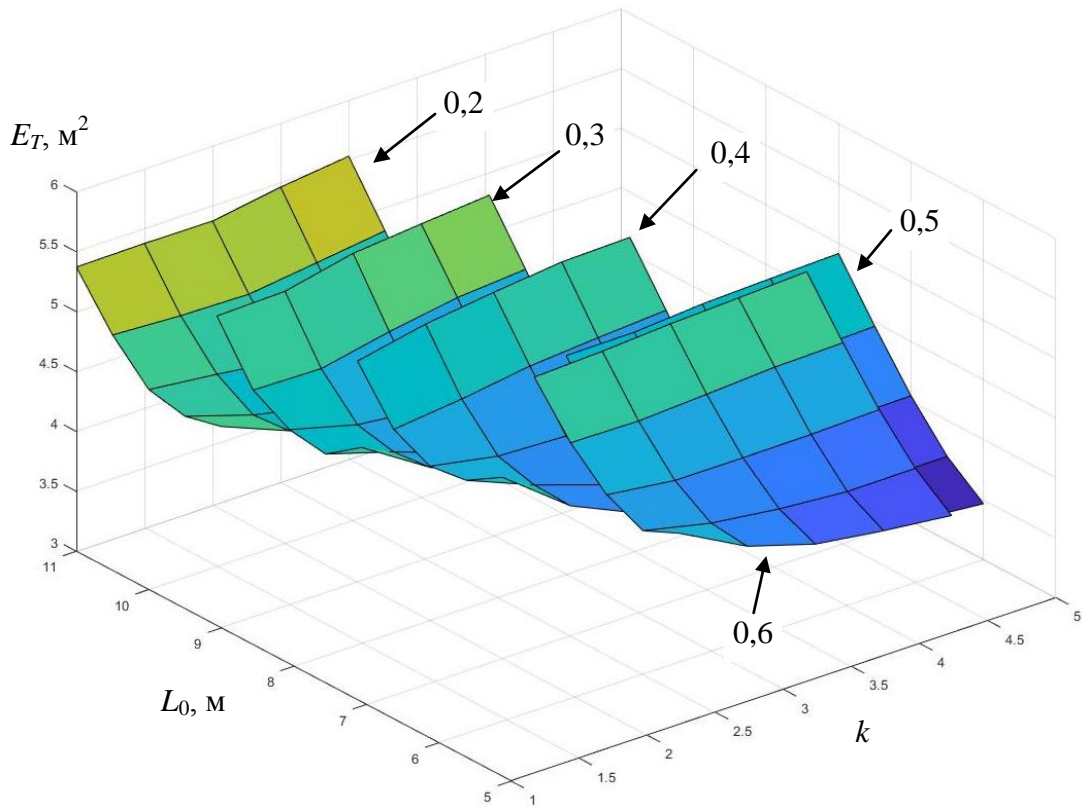


Рисунок 5.4.28 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 7$ м, $V = 1,5$ м/с)

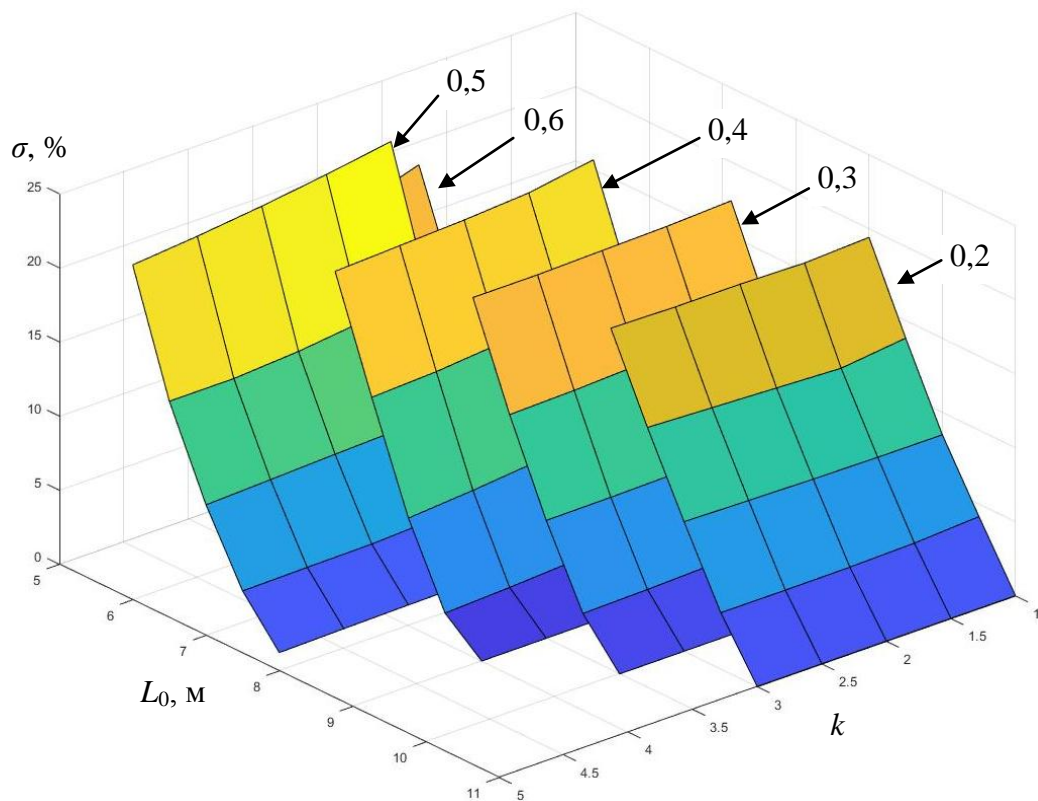


Рисунок 5.4.29 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 7$ м, $V = 1,5$ м/с)

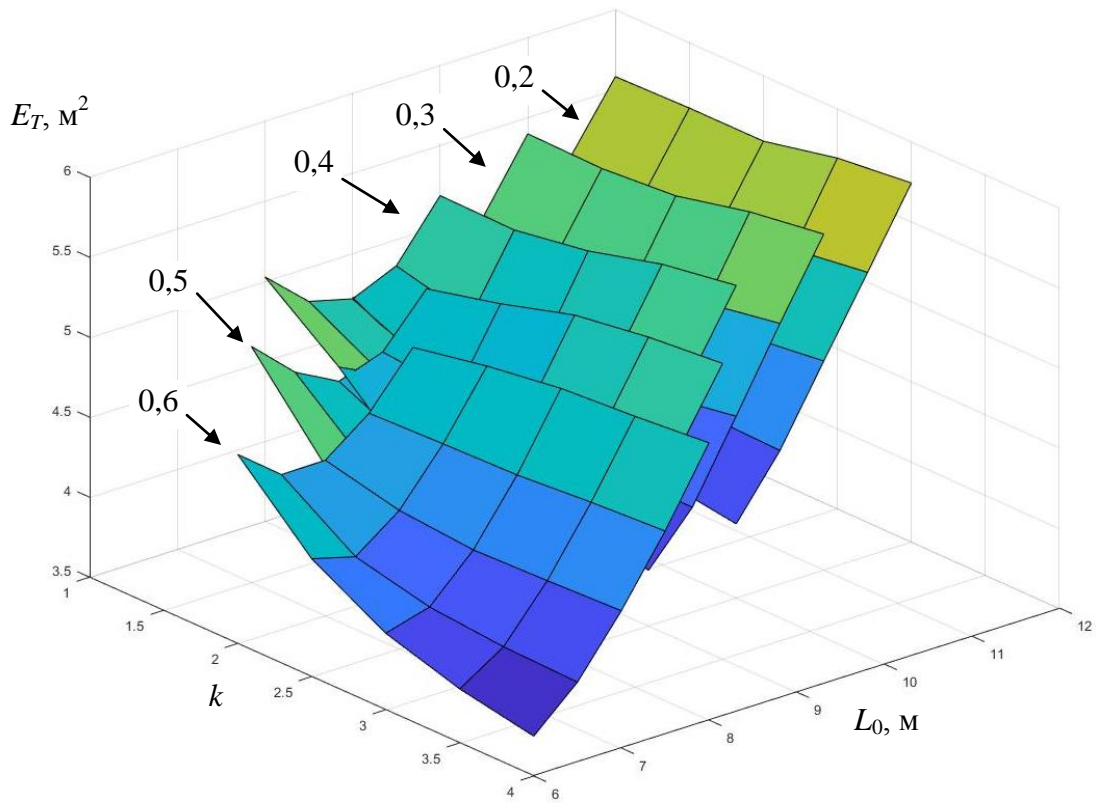


Рисунок 5.4.30 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_δ ($L = 8$ м, $V = 1,5$ м/с)

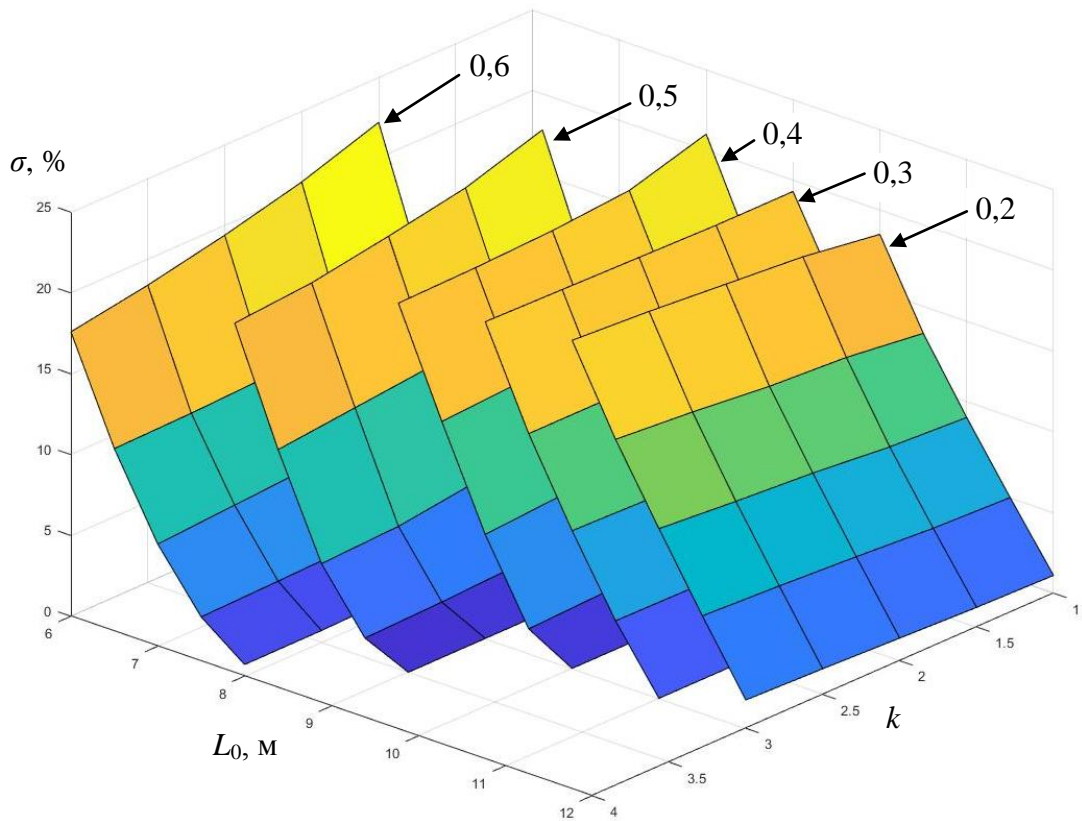


Рисунок 5.4.31 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_δ ($L = 8$ м, $V = 1,5$ м/с)

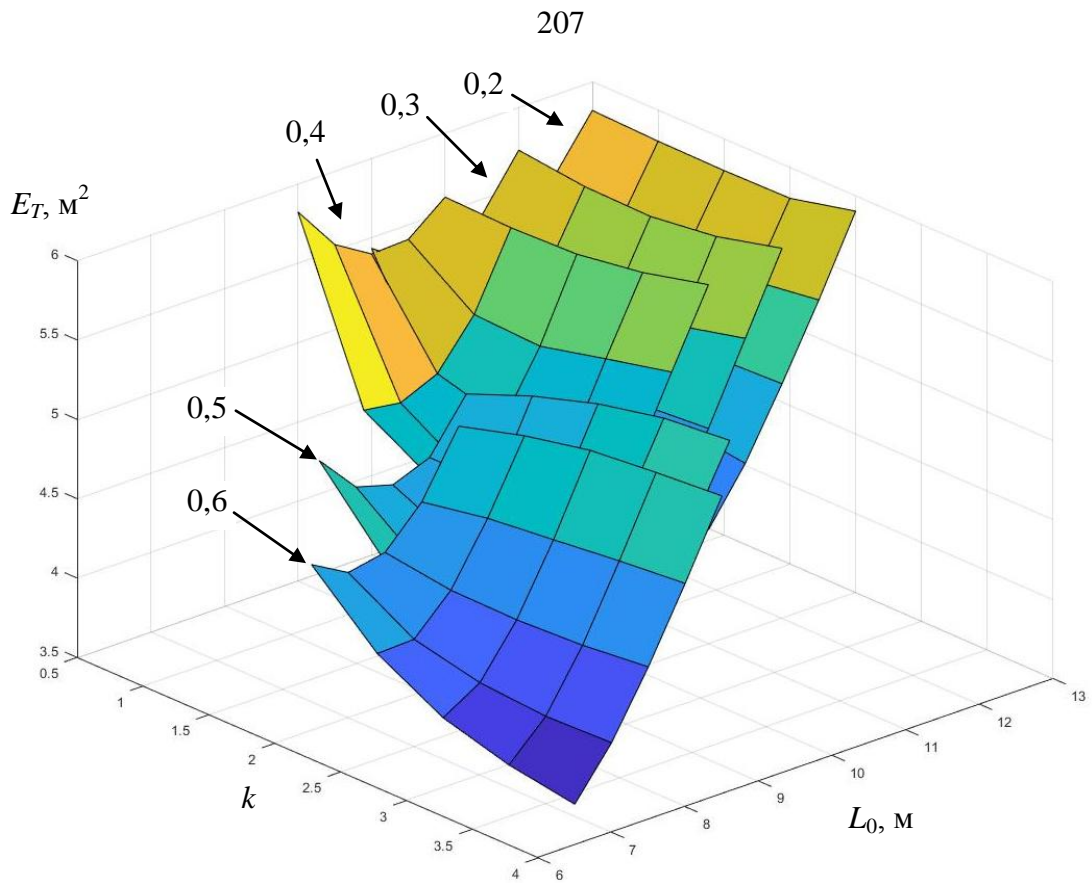


Рисунок 5.4.32 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 9$ м, $V = 1,5$ м/с)

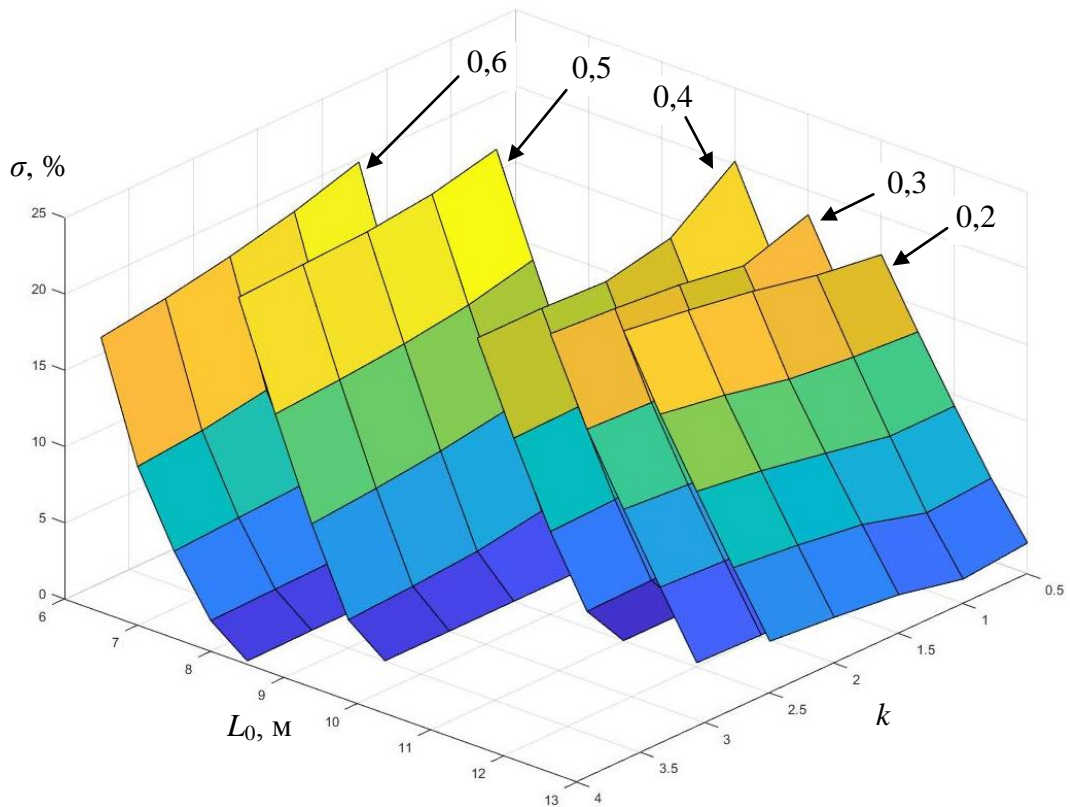


Рисунок 5.4.33 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 9$ м, $V = 1,5$ м/с)

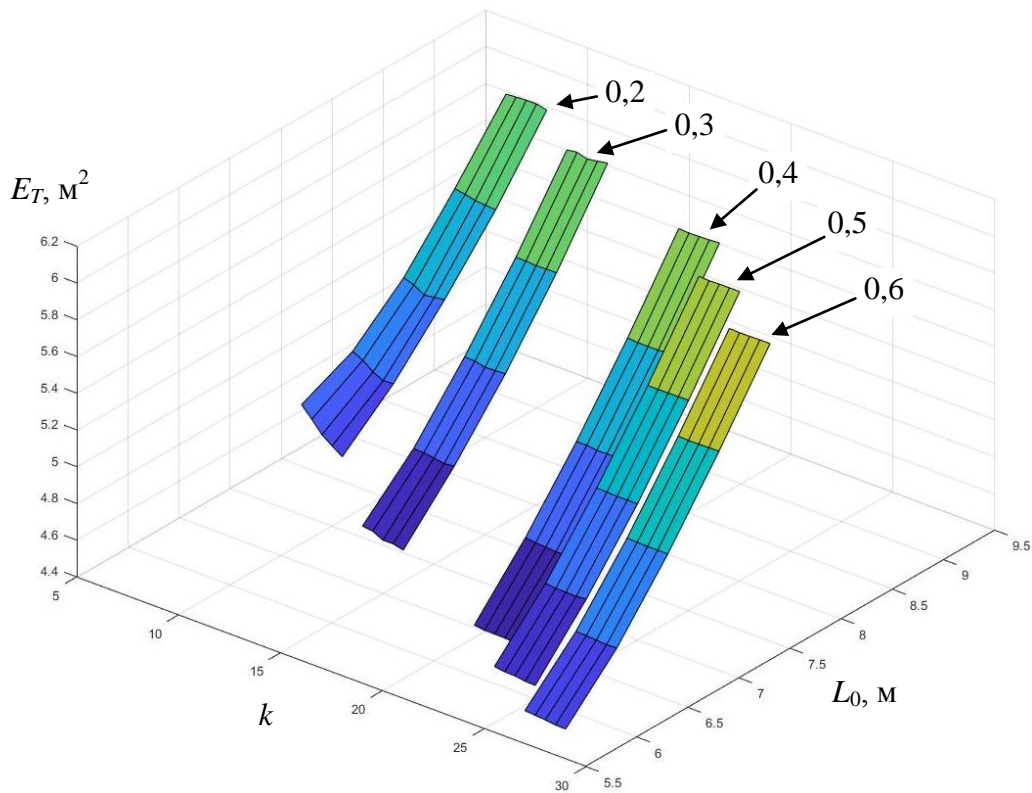


Рисунок 5.4.34 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_U и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 5$ м, $V = 2$ м/с)

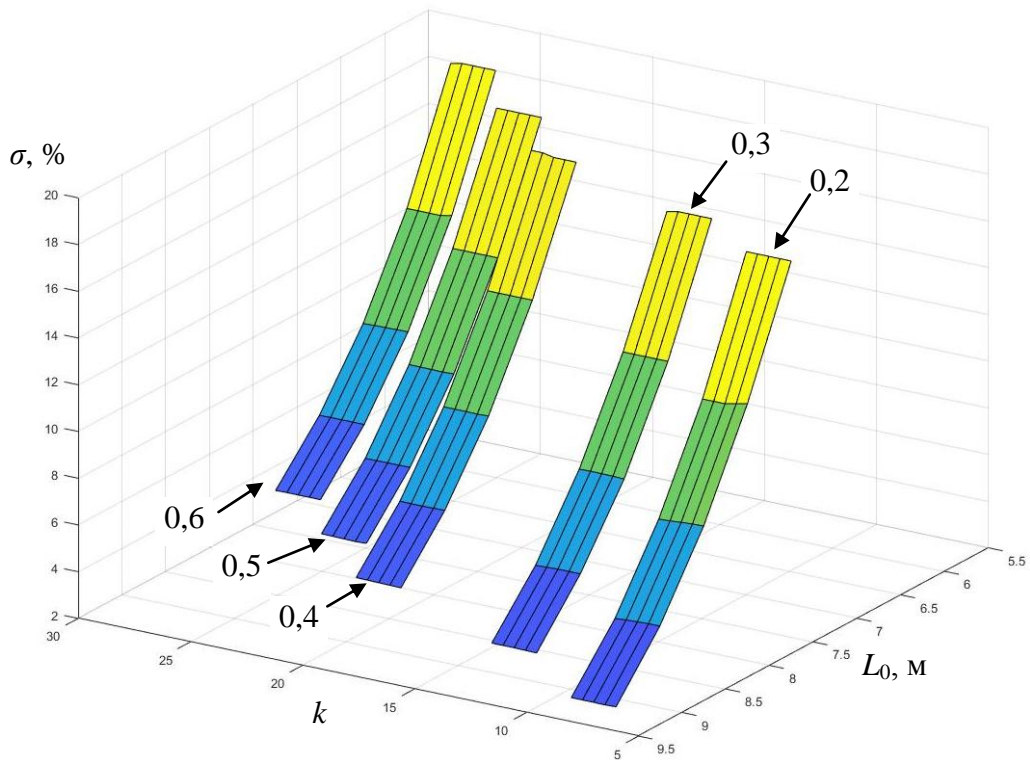


Рисунок 5.4.35 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_U и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 5$ м, $V = 2$ м/с)

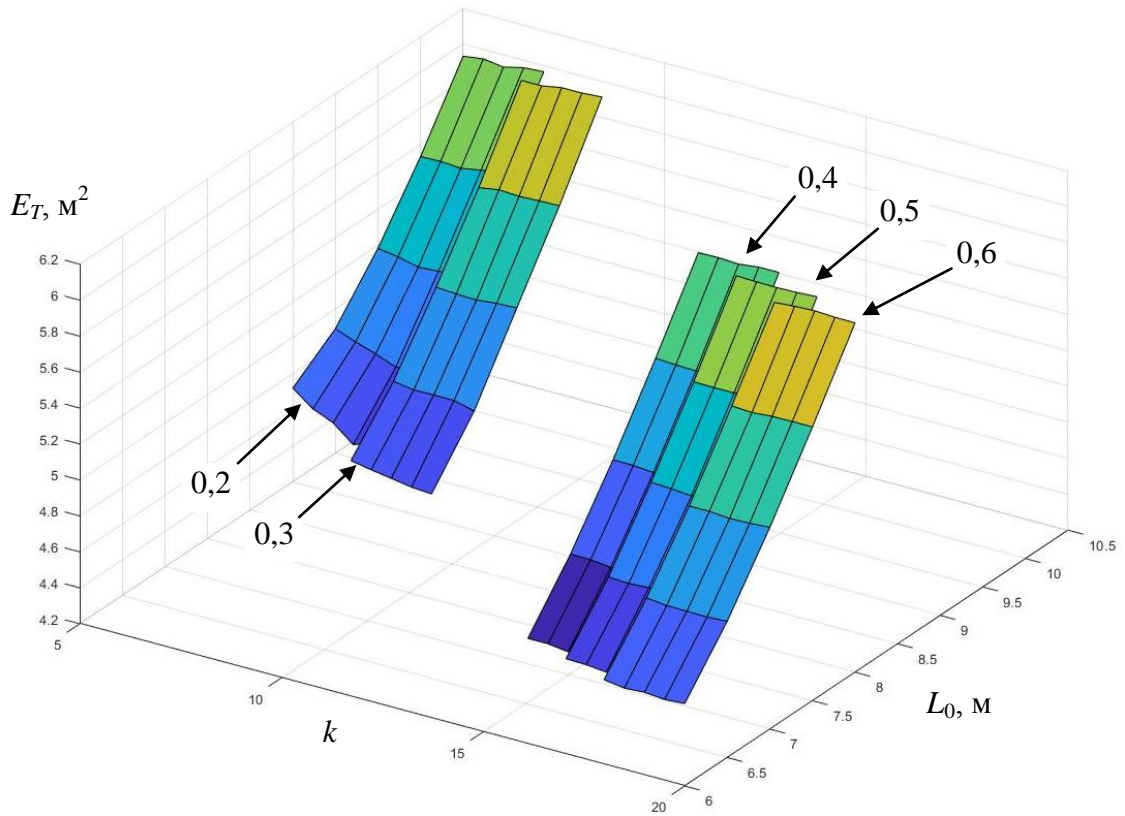


Рисунок 5.4.36 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 6$ м, $V = 2$ м/с)

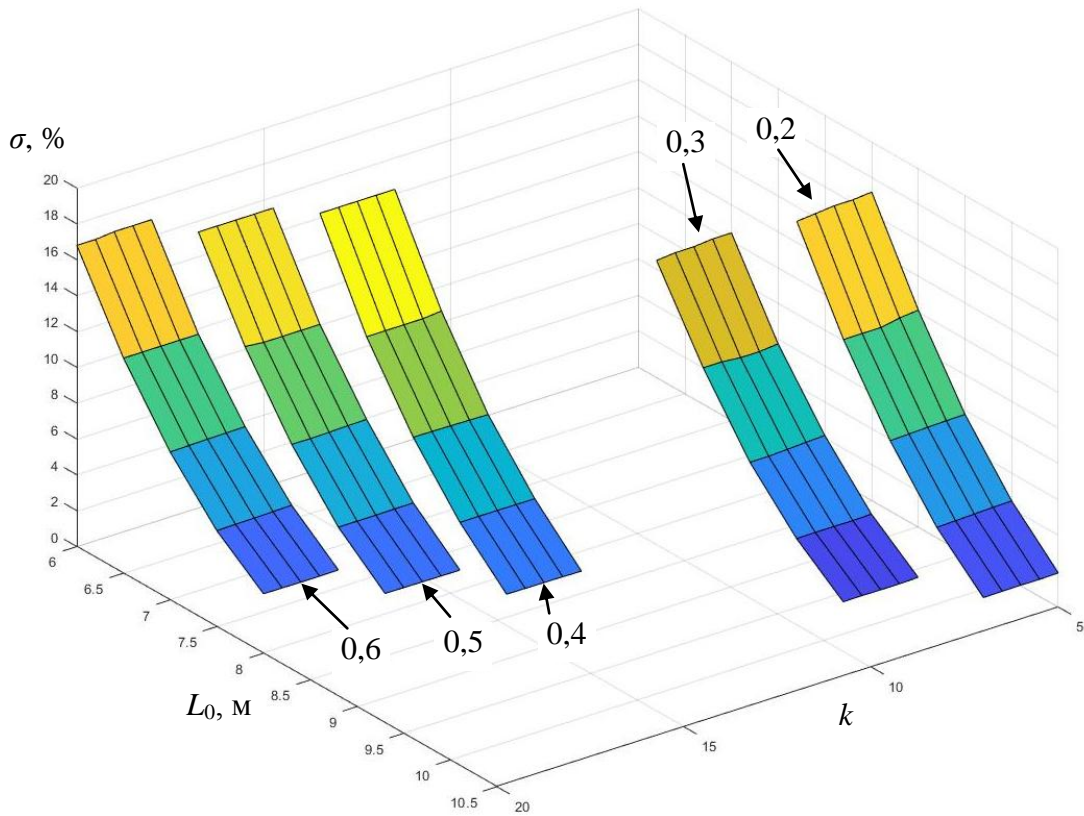


Рисунок 5.4.37 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 6$ м, $V = 2$ м/с)

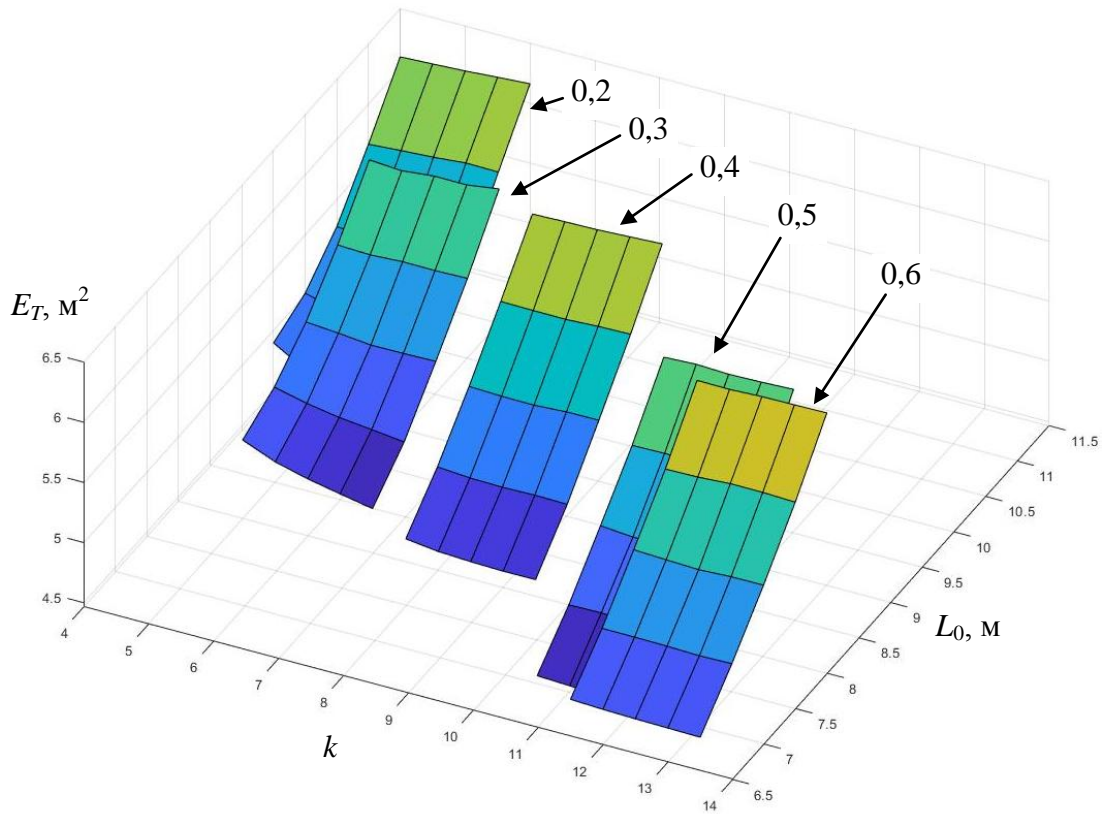


Рисунок 5.4.38 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 7$ м, $V = 2$ м/с)

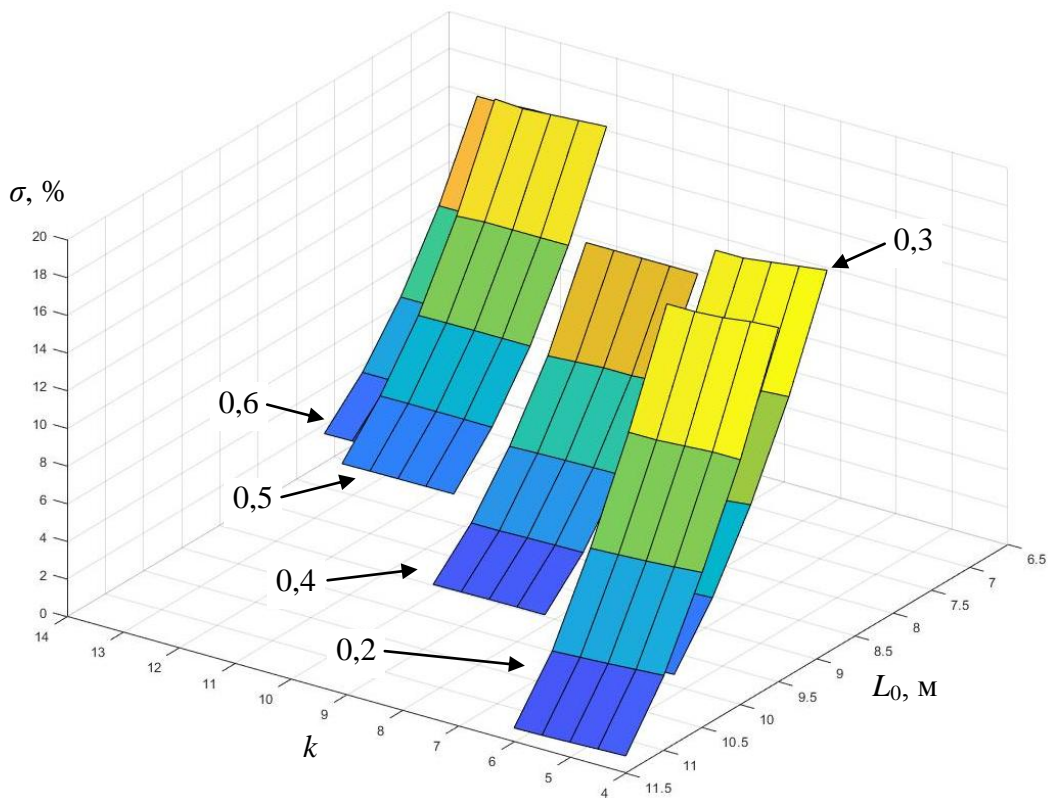


Рисунок 5.4.39 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 7$ м, $V = 2$ м/с)

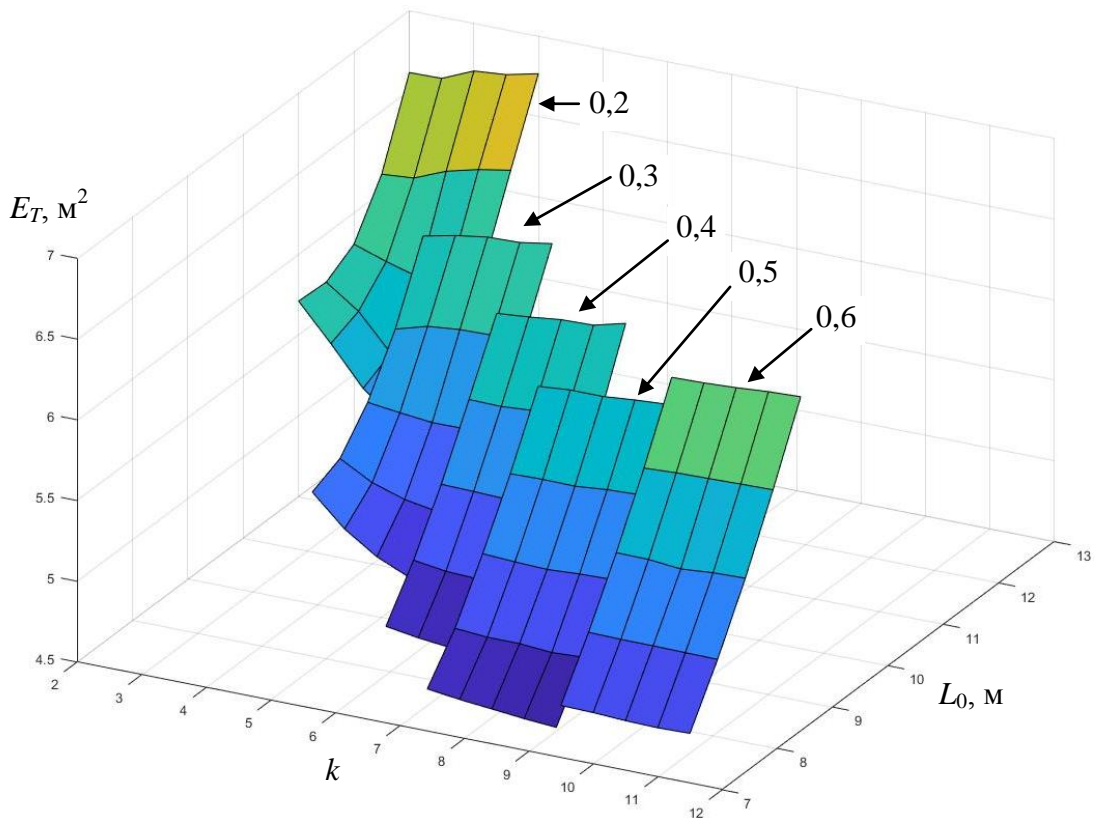


Рисунок 5.4.40 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_b ($L = 8$ м, $V = 2$ м/с)

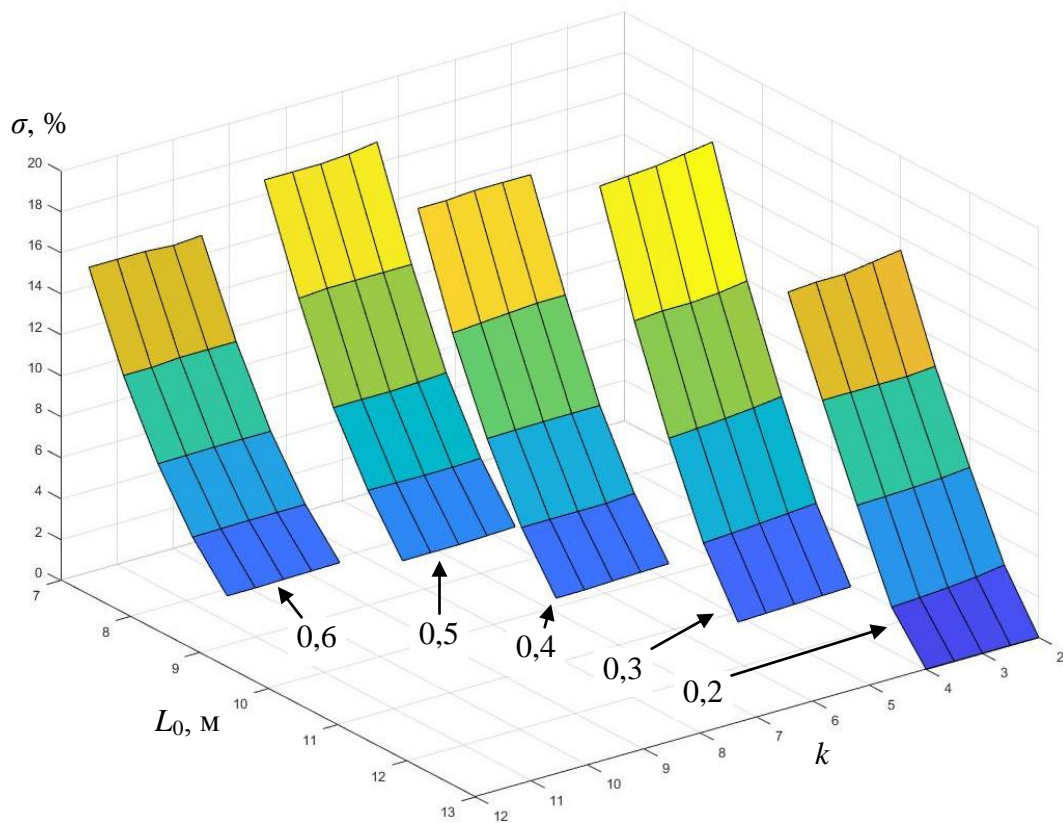


Рисунок 5.4.41 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_b ($L = 8$ м, $V = 2$ м/с)

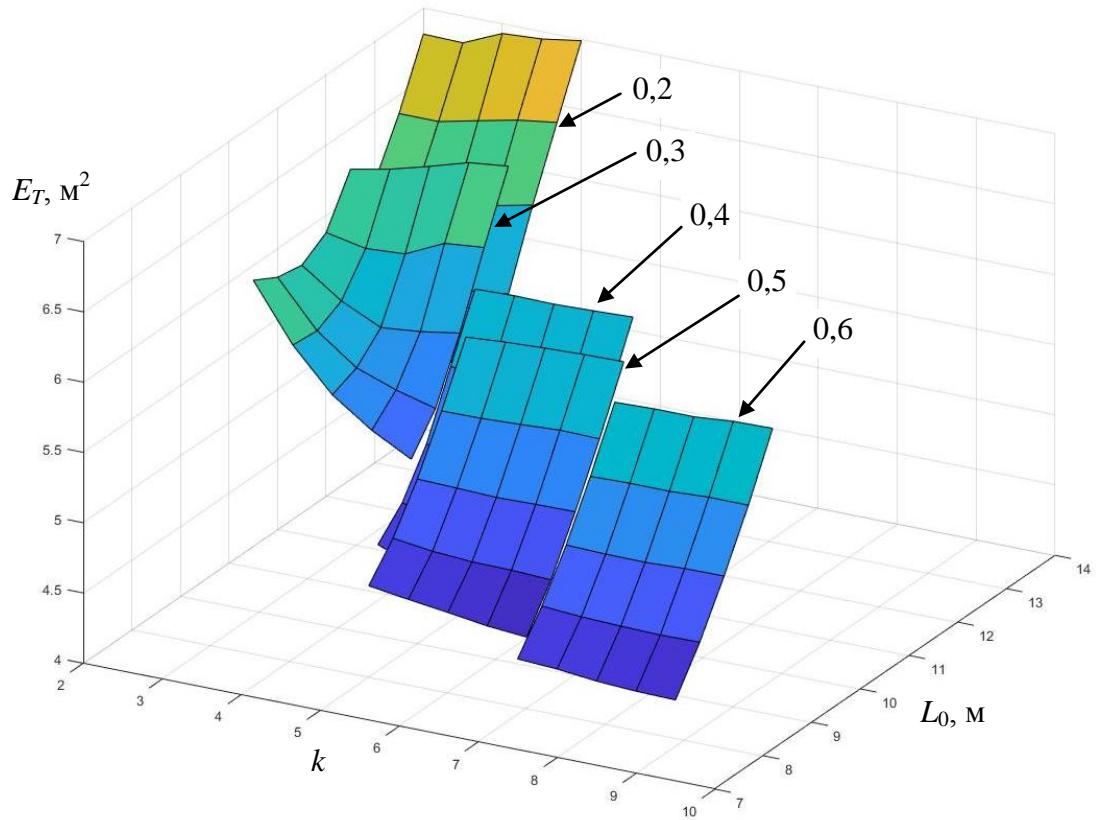


Рисунок 5.4.42 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_b ($L = 9$ м, $V = 2$ м/с)

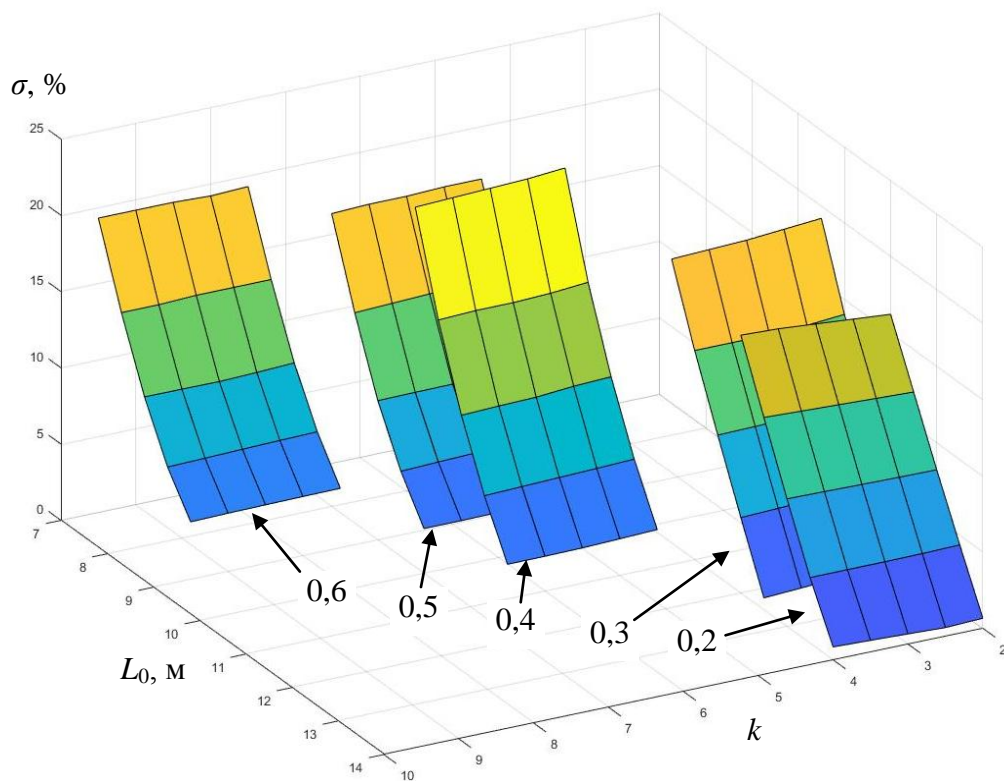


Рисунок 5.4.43 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_b ($L = 9$ м, $V = 2$ м/с)

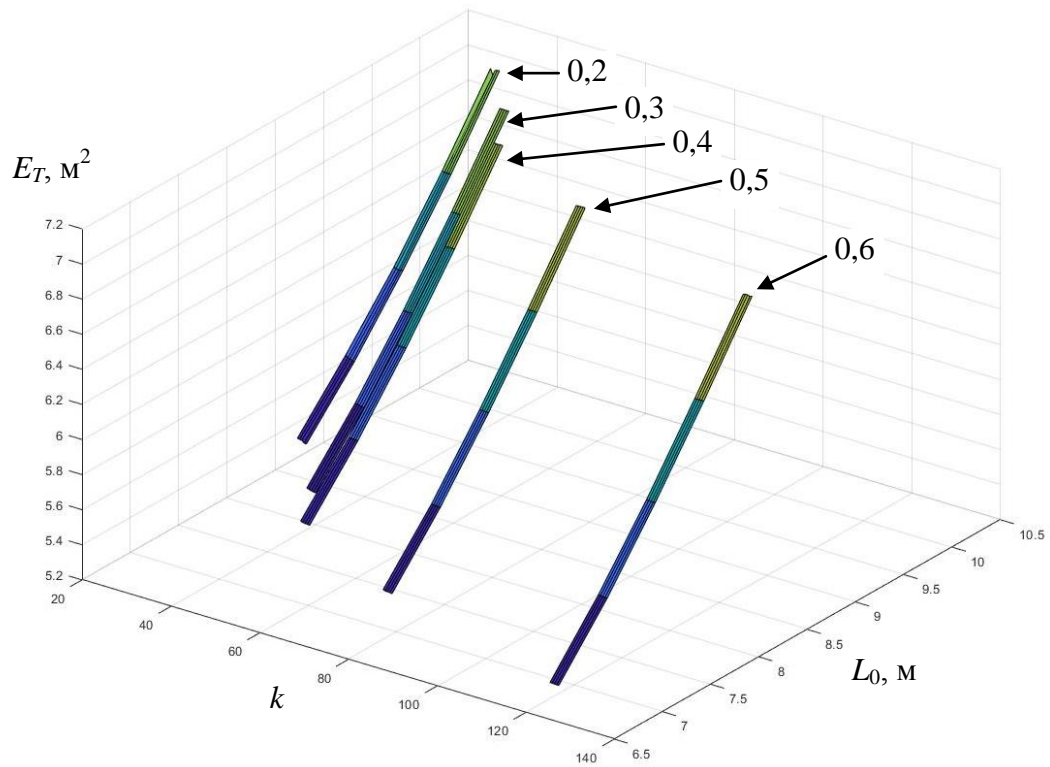


Рисунок 5.4.44 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 5$ м, $V = 2,5$ м/с)

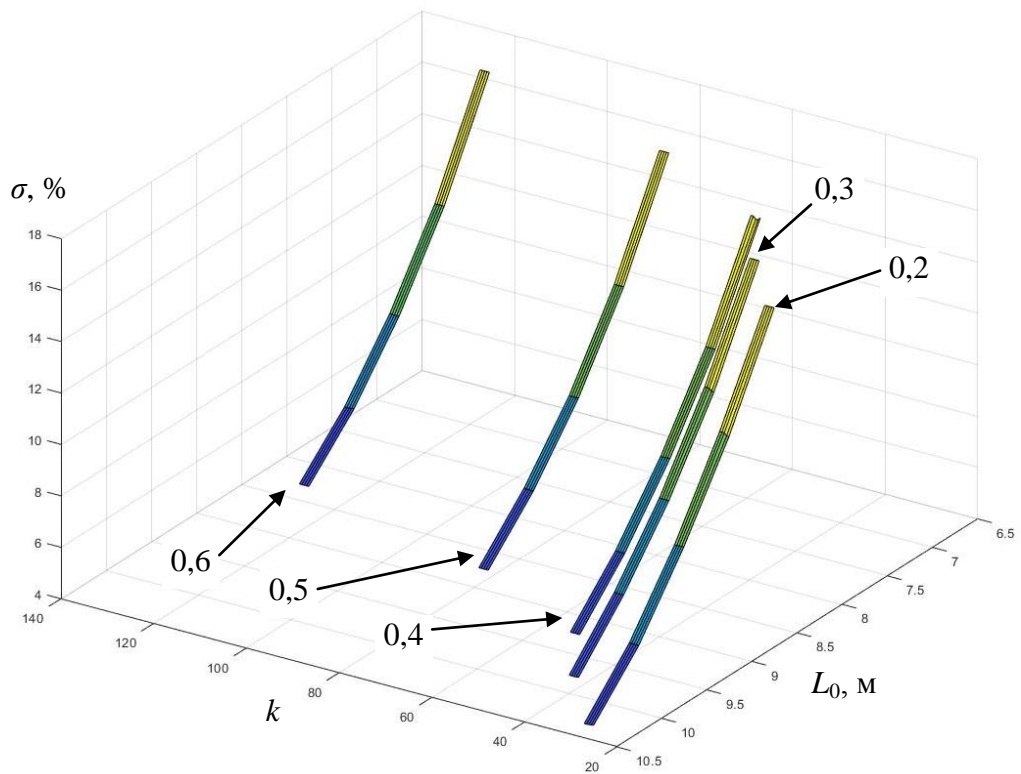


Рисунок 5.4.45 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_Y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 5$ м, $V = 2,5$ м/с)

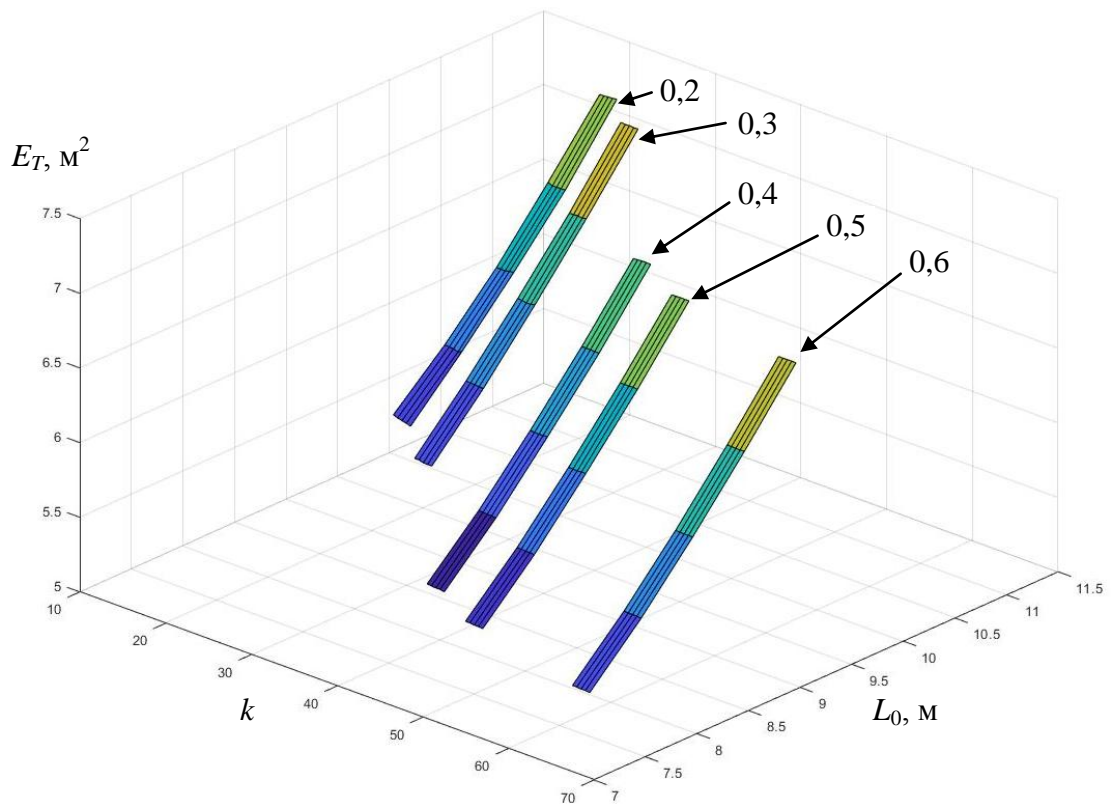


Рисунок 5.4.46 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_U и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 6$ м, $V = 2,5$ м/с)

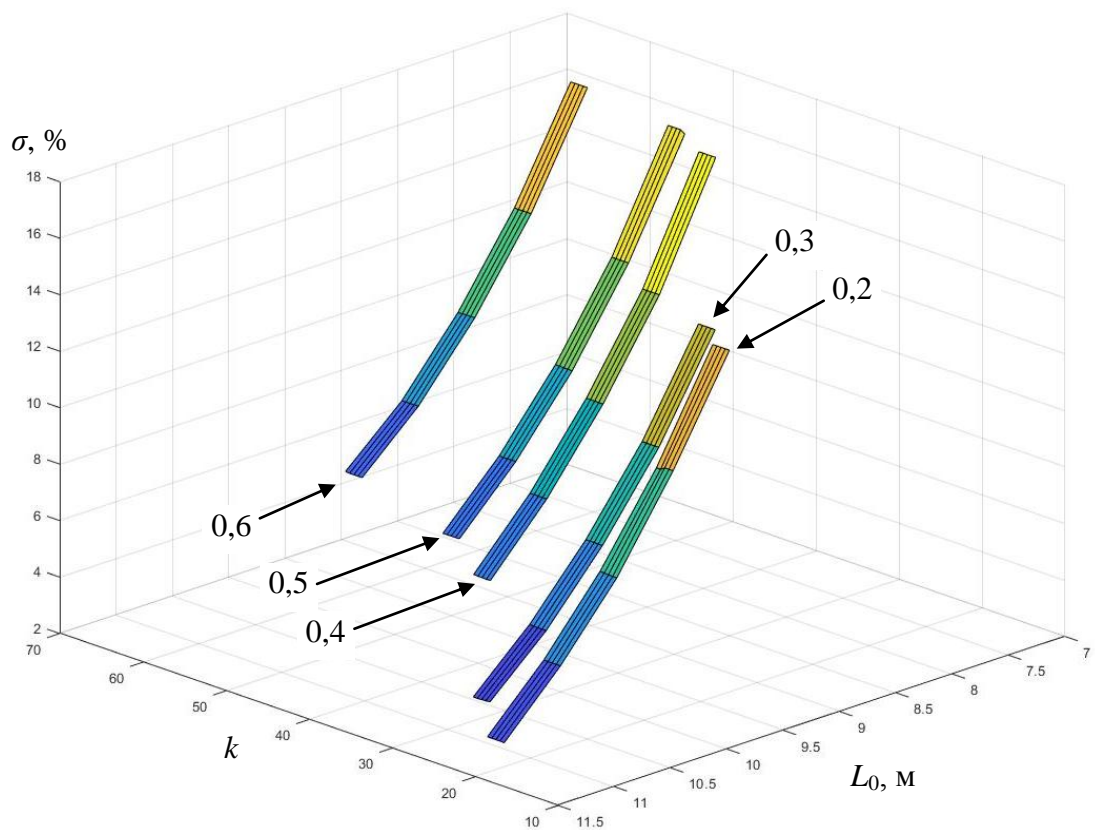


Рисунок 5.4.47 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_U и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 6$ м, $V = 2,5$ м/с)

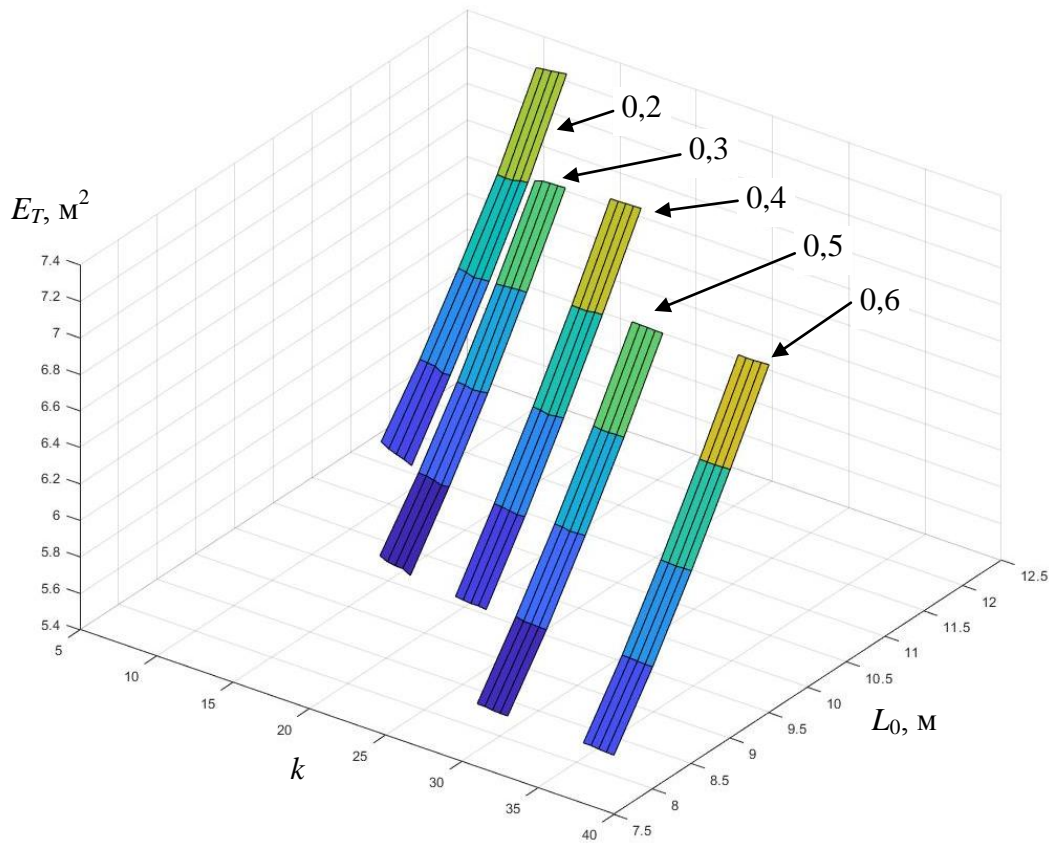


Рисунок 5.4.48 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_U и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_δ ($L = 7$ м, $V = 2,5$ м/с)

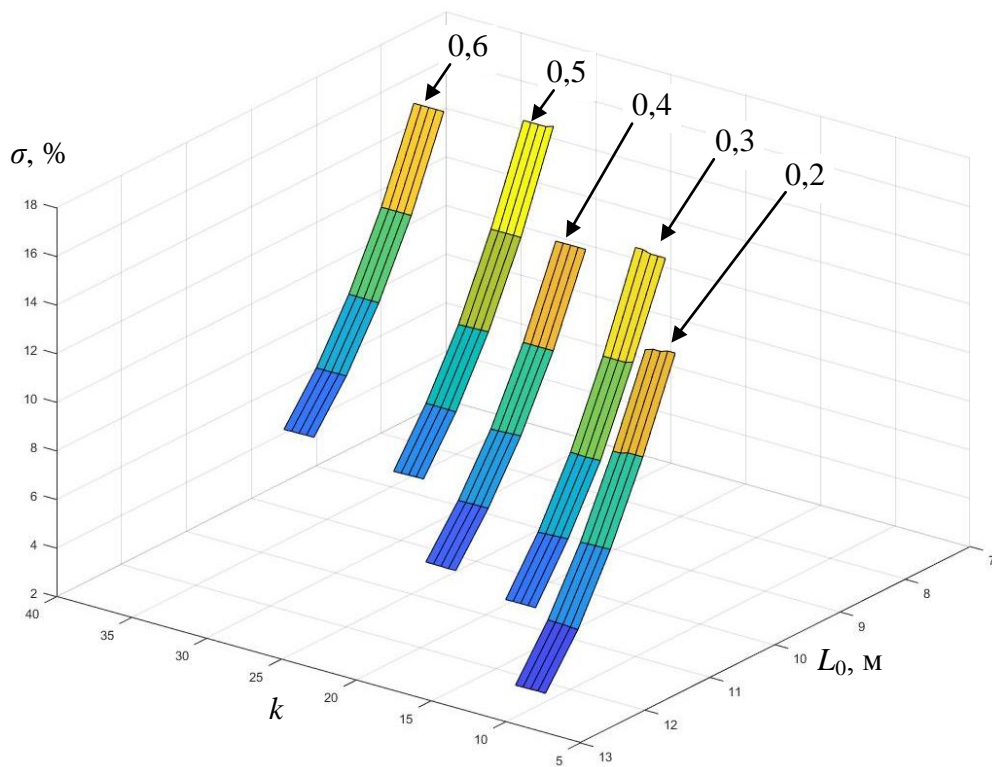


Рисунок 5.4.49 – Зависимости перегулирования σ от коэффициента усиления k_U и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_δ ($L = 7$ м, $V = 2,5$ м/с)

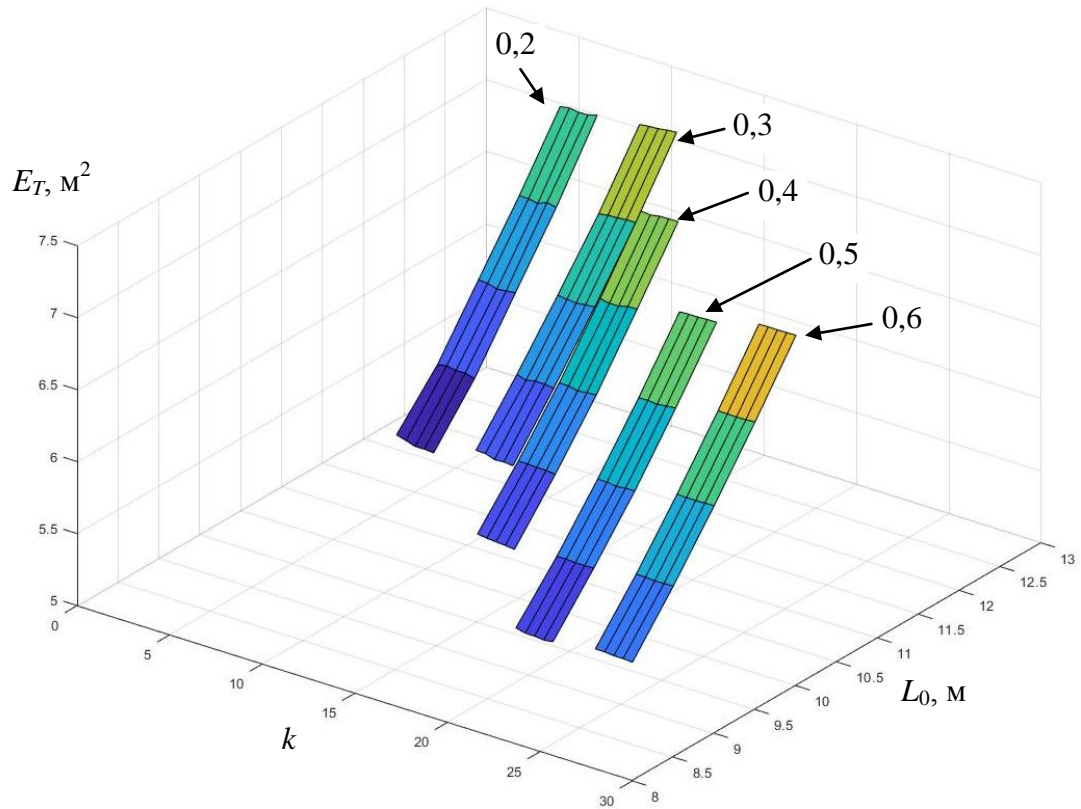


Рисунок 5.4.50 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_δ ($L = 8 \text{ м}$, $V = 2,5 \text{ м/с}$)

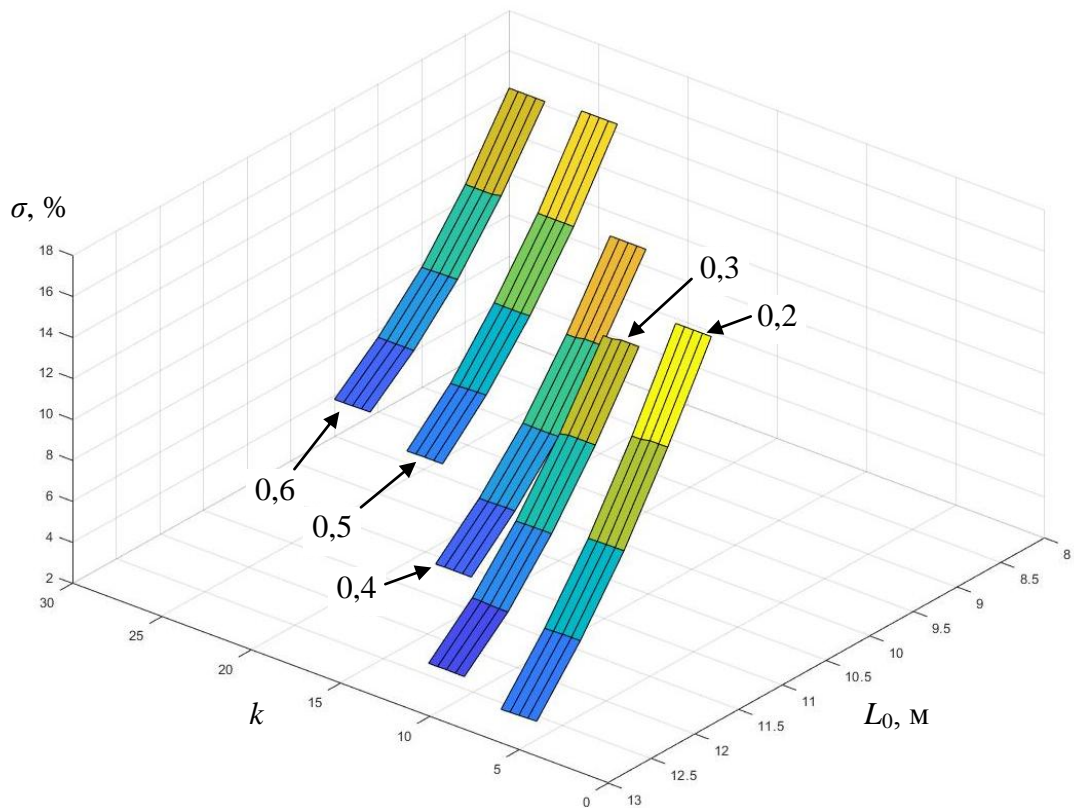


Рисунок 5.4.51 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_δ ($L = 8 \text{ м}$, $V = 2,5 \text{ м/с}$)

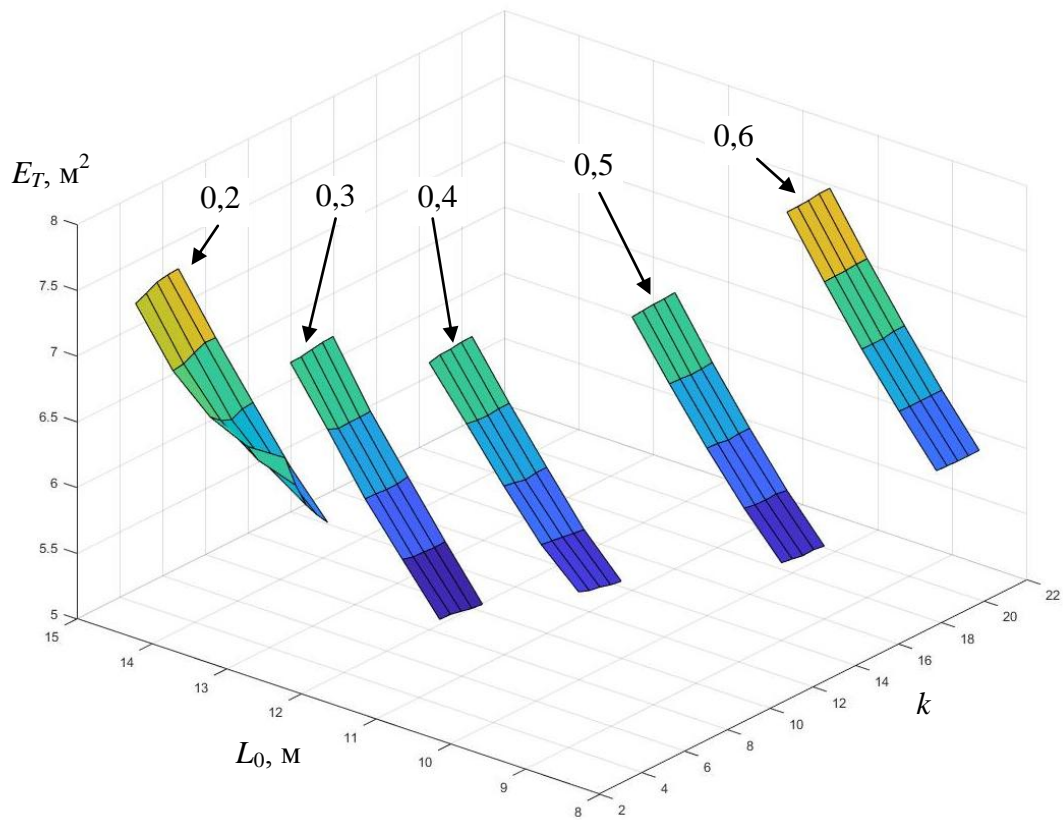


Рисунок 5.4.52 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_U и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_b ($L = 9$ м, $V = 2,5$ м/с)

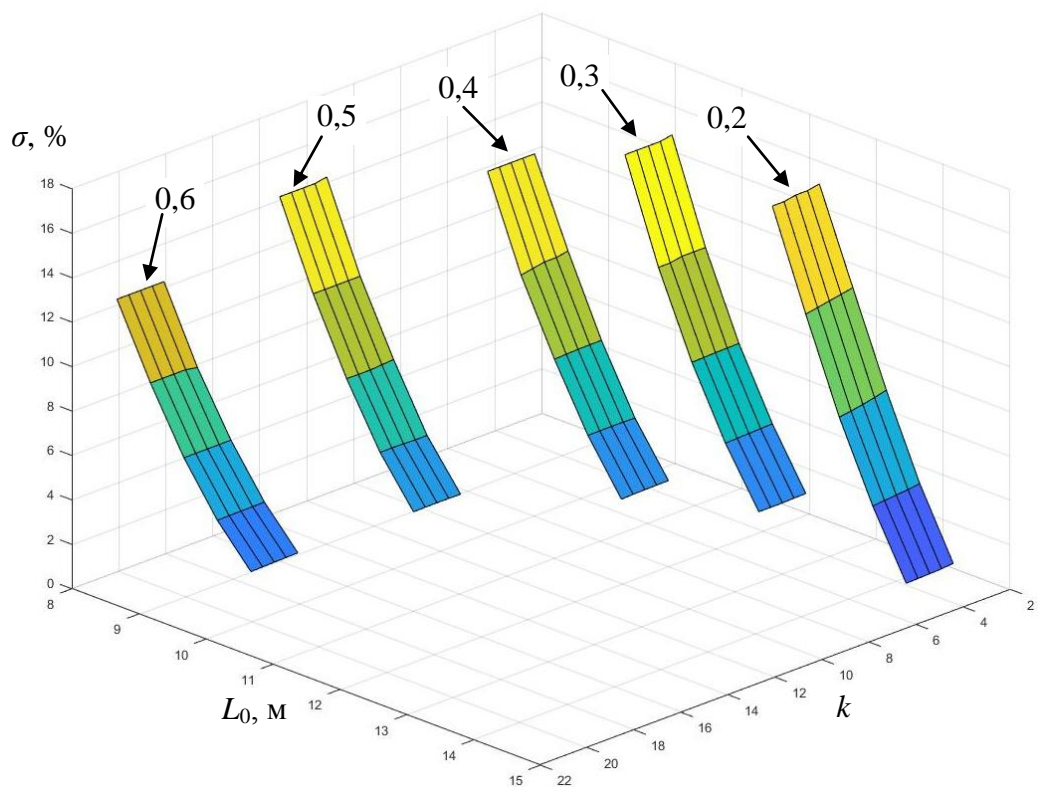


Рисунок 5.4.53 – Зависимости перегулирования σ от коэффициента усиления k_U и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_b ($L = 9$ м, $V = 2,5$ м/с)

Полученные зависимости были аппроксимированы методом наименьших квадратов. Уравнения регрессии представлены в таблицах 5.15 – 5.19.

Таблица 5.15

Уравнения регрессии для скорости $V = 0,5$ м/с

L, K_0	Уравнение регрессии	R^2
5	$E_T = 14,04 - 3,747 \cdot k_y + 0,3858 \cdot k_y^2 - 3,437 \cdot L_0 + 0,2681 \cdot L_0^2 + 0,3929 \cdot k_y \cdot L_0$	0,89
	$\sigma = 264 + 2,23 \cdot k_y + 1,627 \cdot k_y^2 - 73,99 \cdot L_0 + 5,235 \cdot L_0^2 - 1,038 \cdot k_y \cdot L_0$	0,99
	$E_T = 13,1 - 4,048 \cdot k_y + 0,445 \cdot k_y^2 - 3,229 \cdot L_0 + 0,264 \cdot L_0^2 + 0,4425 \cdot k_y \cdot L_0$	0,885
	$\sigma = 268,5 - 6,985 \cdot k_y + 2,299 \cdot k_y^2 - 80,91 \cdot L_0 + 6,206 \cdot L_0^2 - 0,096 \cdot k_y \cdot L_0$	0,988
	$E_T = 12,04 - 4,166 \cdot k_y + 0,4974 \cdot k_y^2 - 2,975 \cdot L_0 + 0,2574 \cdot L_0^2 + 0,4688 \cdot k_y \cdot L_0$	0,892
	$\sigma = 265,5 - 17,74 \cdot k_y + 3,202 \cdot k_y^2 - 85,36 \cdot L_0 + 7,05 \cdot L_0^2 + 1,174 \cdot k_y \cdot L_0$	0,984
6	$E_T = 11,13 - 4,07 \cdot k_y + 0,5396 \cdot k_y^2 - 2,804 \cdot L_0 + 0,2638 \cdot L_0^2 + 0,4606 \cdot k_y \cdot L_0$	0,897
	$\sigma = 260,4 - 28,06 \cdot k_y + 4,316 \cdot k_y^2 - 89,33 \cdot L_0 + 7,984 \cdot L_0^2 + 2,407 \cdot k_y \cdot L_0$	0,978
	$E_T = 8,987 - 0,5239 \cdot k_y + 0,008177 \cdot k_y^2 - 3,472 \cdot L_0 + 0,4387 \cdot L_0^2 + 0,1167 \cdot k_y \cdot L_0$	0,9422
	$\sigma = 302,9 - 1,888 \cdot k_y + 0,179 \cdot k_y^2 - 122,7 \cdot L_0 + 12,45 \cdot L_0^2 + 0,164 \cdot k_y \cdot L_0$	0,997
	$E_T = 14,52 - 3,501 \cdot k_y + 0,3469 \cdot k_y^2 - 3,233 \cdot L_0 + 0,2273 \cdot L_0^2 + 0,3265 \cdot k_y \cdot L_0$	0,89
	$\sigma = 276,6 + 8,788 \cdot k_y + 1,208 \cdot k_y^2 - 69,1 \cdot L_0 + 4,335 \cdot L_0^2 - 1,515 \cdot k_y \cdot L_0$	0,991
7	$E_T = 16,11 - 4,8 \cdot k_y + 0,515 \cdot k_y^2 - 3,681 \cdot L_0 + 0,2645 \cdot L_0^2 + 0,4823 \cdot k_y \cdot L_0$	0,89
	$\sigma = 219,9 - 0,714 \cdot k_y + 2,275 \cdot k_y^2 - 56,06 \cdot L_0 + 3,604 \cdot L_0^2 - 0,912 \cdot k_y \cdot L_0$	0,993
	$E_T = 14,1 - 4,703 \cdot k_y + 0,5555 \cdot k_y^2 - 3,261 \cdot L_0 + 0,252 \cdot L_0^2 + 0,4825 \cdot k_y \cdot L_0$	0,894
	$\sigma = 254,9 - 11,34 \cdot k_y + 3,216 \cdot k_y^2 - 73,09 \cdot L_0 + 5,385 \cdot L_0^2 + 0,043 \cdot k_y \cdot L_0$	0,983
	$E_T = 12,61 - 4,42 \cdot k_y + 0,5837 \cdot k_y^2 - 3,011 \cdot L_0 + 0,2583 \cdot L_0^2 + 0,4531 \cdot k_y \cdot L_0$	0,9
	$\sigma = 263,3 - 23,99 \cdot k_y + 4,374 \cdot k_y^2 - 82,02 \cdot L_0 + 6,662 \cdot L_0^2 + 1,472 \cdot k_y \cdot L_0$	0,98
8	$E_T = 10,59 - 0,7983 \cdot k_y - 0,00721 \cdot k_y^2 - 3,594 \cdot L_0 + 0,3859 \cdot L_0^2 + 0,1704 \cdot k_y \cdot L_0$	0,832
	$\sigma = 267,5 - 11,5 \cdot k_y - 0,45 \cdot k_y^2 - 115,7 \cdot L_0 + 8,151 \cdot L_0^2 - 0,843 \cdot k_y \cdot L_0$	0,994
	$E_T = 18,76 - 4,685 \cdot k_y + 0,4363 \cdot k_y^2 - 3,817 \cdot L_0 + 0,233 \cdot L_0^2 + 0,4132 \cdot k_y \cdot L_0$	0,881
	$\sigma = 188,4 + 10,22 \cdot k_y + 1,219 \cdot k_y^2 - 38,15 \cdot L_0 + 1,881 \cdot L_0^2 - 1,4 \cdot k_y \cdot L_0$	0,997
	$E_T = 16,35 - 4,534 \cdot k_y + 0,4694 \cdot k_y^2 - 3,43 \cdot L_0 + 0,2266 \cdot L_0^2 + 0,4086 \cdot k_y \cdot L_0$	0,871
	$\sigma = 258,3 + 3,449 \cdot k_y + 1,988 \cdot k_y^2 - 61,92 \cdot L_0 + 3,75 \cdot L_0^2 - 1,162 \cdot k_y \cdot L_0$	0,99
9	$E_T = 16,42 - 5,161 \cdot k_y + 0,6081 \cdot k_y^2 - 3,601 \cdot L_0 + 0,2543 \cdot L_0^2 + 0,483 \cdot k_y \cdot L_0$	0,897
	$\sigma = 224,8 - 6,159 \cdot k_y + 3,267 \cdot k_y^2 - 56,58 \cdot L_0 + 3,651 \cdot L_0^2 - 0,7008 \cdot k_y \cdot L_0$	0,991
	$E_T = 14,09 - 4,752 \cdot k_y + 0,6227 \cdot k_y^2 - 3,183 \cdot L_0 + 0,2504 \cdot L_0^2 + 0,4468 \cdot k_y \cdot L_0$	0,9
	$\sigma = 265,8 - 20,01 \cdot k_y + 4,311 \cdot k_y^2 - 75,95 \cdot L_0 + 5,655 \cdot L_0^2 + 0,7472 \cdot k_y \cdot L_0$	0,981

0,6	$E_T = 12,98 - 1,922 \cdot k_y + 0,102 \cdot k_y^2 - 3,989 \cdot L_0 + 0,3881 \cdot L_0^2 + 0,3047 \cdot k_y \cdot L_0$	0,854
	$\sigma = 294 - 4,727 \cdot k_y + 0,778 \cdot k_y^2 - 104,5 \cdot L_0 + 9,378 \cdot L_0^2 + 0,1832 \cdot k_y \cdot L_0$	0,992
0,2	$E_T = 20,27 - 4,408 \cdot k_y + 0,3928 \cdot k_y^2 - 3,865 \cdot L_0 + 0,2177 \cdot L_0^2 + 0,3553 \cdot k_y \cdot L_0$	0,872
	$\sigma = 202,2 + 13,97 \cdot k_y + 0,966 \cdot k_y^2 - 38,27 \cdot L_0 + 1,776 \cdot L_0^2 - 1,509 \cdot k_y \cdot L_0$	0,995
0,3	$E_T = 19,42 - 5,415 \cdot k_y + 0,5315 \cdot k_y^2 - 3,775 \cdot L_0 + 0,2224 \cdot L_0^2 + 0,4638 \cdot k_y \cdot L_0$	0,875
	$\sigma = 188,3 + 5,679 \cdot k_y + 1,891 \cdot k_y^2 - 37,43 \cdot L_0 + 1,824 \cdot L_0^2 - 1,189 \cdot k_y \cdot L_0$	0,995
0,4	$E_T = 18,83 - 5,565 \cdot k_y + 0,6644 \cdot k_y^2 - 3,932 \cdot L_0 + 0,2575 \cdot L_0^2 + 0,4737 \cdot k_y \cdot L_0$	0,905
	$\sigma = 185,1 - 1,835 \cdot k_y + 3,248 \cdot k_y^2 - 39,66 \cdot L_0 + 2,134 \cdot L_0^2 - 1,176 \cdot k_y \cdot L_0$	0,994
0,5	$E_T = 15,65 - 5,111 \cdot k_y + 0,6532 \cdot k_y^2 - 3,35 \cdot L_0 + 0,2425 \cdot L_0^2 + 0,4507 \cdot k_y \cdot L_0$	0,898
	$\sigma = 264,3 - 16,16 \cdot k_y + 4,247 \cdot k_y^2 - 69,54 \cdot L_0 + 4,764 \cdot L_0^2 + 0,164 \cdot k_y \cdot L_0$	0,979
0,6	$E_T = 14,14 - 4,215 \cdot k_y + 0,6521 \cdot k_y^2 - 3,404 \cdot L_0 + 0,3398 \cdot L_0^2 + 0,2985 \cdot k_y \cdot L_0$	0,854
	$\sigma = 239,6 - 24,51 \cdot k_y + 6,052 \cdot k_y^2 - 68,51 \cdot L_0 + 5,317 \cdot L_0^2 + 0,1704 \cdot k_y \cdot L_0$	0,984
0,2	$E_T = 22,85 - 5,568 \cdot k_y + 0,4699 \cdot k_y^2 - 3,93 \cdot L_0 + 0,1962 \cdot L_0^2 + 0,427 \cdot k_y \cdot L_0$	0,873
	$\sigma = 169,4 + 11,46 \cdot k_y + 0,548 \cdot k_y^2 - 27 \cdot L_0 + 0,9873 \cdot L_0^2 - 0,852 \cdot k_y \cdot L_0$	0,998
0,3	$E_T = 19,7 - 4,867 \cdot k_y + 0,4606 \cdot k_y^2 - 3,623 \cdot L_0 + 0,2013 \cdot L_0^2 + 0,3824 \cdot k_y \cdot L_0$	0,854
	$\sigma = 226,2 + 10,55 \cdot k_y + 1,611 \cdot k_y^2 - 44,18 \cdot L_0 + 2,154 \cdot L_0^2 - 1,483 \cdot k_y \cdot L_0$	0,99
0,4	$E_T = 17,64 - 5,478 \cdot k_y + 0,5882 \cdot k_y^2 - 3,287 \cdot L_0 + 0,1944 \cdot L_0^2 + 0,449 \cdot k_y \cdot L_0$	0,863
	$\sigma = 244,8 - 0,9725 \cdot k_y + 2,706 \cdot k_y^2 - 52,98 \cdot L_0 + 2,909 \cdot L_0^2 - 0,8512 \cdot k_y \cdot L_0$	0,984
0,5	$E_T = 17,3 - 5,426 \cdot k_y + 0,6846 \cdot k_y^2 - 3,533 \cdot L_0 + 0,2381 \cdot L_0^2 + 0,447 \cdot k_y \cdot L_0$	0,912
	$\sigma = 261,5 - 12,96 \cdot k_y + 4,298 \cdot k_y^2 - 63,65 \cdot L_0 + 4,031 \cdot L_0^2 - 0,273 \cdot k_y \cdot L_0$	0,979
0,6	$E_T = 15,64 - 4,614 \cdot k_y + 0,6884 \cdot k_y^2 - 3,569 \cdot L_0 + 0,2869 \cdot L_0^2 + 0,3636 \cdot k_y \cdot L_0$	0,89
	$\sigma = 249,8 - 24,13 \cdot k_y + 5,931 \cdot k_y^2 - 67,1 \cdot L_0 + 4,852 \cdot L_0^2 + 0,2532 \cdot k_y \cdot L_0$	0,982

Таблица 5.16

Уравнения регрессии для скорости $V = 1$ м/с

L	K_6	Уравнение регрессии	R^2
0,2		$E_T = 18,84 - 2,569 \cdot k_y + 0,1022 \cdot k_y^2 - 4,326 \cdot L_0 + 0,3091 \cdot L_0^2 + 0,2964 \cdot k_y \cdot L_0$	0,979
		$\sigma = 274,3 + 0,0063 \cdot k_y + 0,299 \cdot k_y^2 - 63,18 \cdot L_0 + 3,627 \cdot L_0^2 - 0,17 \cdot k_y \cdot L_0$	0,997
0,3		$E_T = 24,66 - 5,136 \cdot k_y + 0,3928 \cdot k_y^2 - 5,672 \cdot L_0 + 0,3967 \cdot L_0^2 + 0,5521 \cdot k_y \cdot L_0$	0,95
		$\sigma = 295,1 - 14,95 \cdot k_y + 2,257 \cdot k_y^2 - 72 \cdot L_0 + 4,459 \cdot L_0^2 + 0,8899 \cdot k_y \cdot L_0$	0,989
0,4		$E_T = 25,19 - 6,038 \cdot k_y + 0,5128 \cdot k_y^2 - 5,941 \cdot L_0 + 0,4295 \cdot L_0^2 + 0,6712 \cdot k_y \cdot L_0$	0,937
		$\sigma = 305,2 - 25,5 \cdot k_y + 3,175 \cdot k_y^2 - 80,07 \cdot L_0 + 5,375 \cdot L_0^2 + 2,032 \cdot k_y \cdot L_0$	0,986
0,5		$E_T = 14,64 - 1,815 \cdot k_y + 0,06166 \cdot k_y^2 - 4,211 \cdot L_0 + 0,3977 \cdot L_0^2 + 0,2821 \cdot k_y \cdot L_0$	0,97
		$\sigma = 287,4 - 7,388 \cdot k_y + 0,3768 \cdot k_y^2 - 90,83 \cdot L_0 + 7,231 \cdot L_0^2 + 0,859 \cdot k_y \cdot L_0$	0,998

0,6	$E_T = 17,1 - 2,149 \cdot k_Y + 0,08534 \cdot k_Y^2 - 5,101 \cdot L_0 + 0,4931 \cdot L_0^2 + 0,3342 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,951
	$\sigma = 271,6 - 12,35 \cdot k_Y + 0,58 \cdot k_Y^2 - 91,62 \cdot L_0 + 7,863 \cdot L_0^2 + 1,603 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,2	$E_T = 14,26 - 2,244 \cdot k_Y + 0,08762 \cdot k_Y^2 - 2,846 \cdot L_0 + 0,1912 \cdot L_0^2 + 0,2334 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,99
	$\sigma = 227 + 5,109 \cdot k_Y + 0,15 \cdot k_Y^2 - 44 \cdot L_0 + 2,087 \cdot L_0^2 - 0,608 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,3	$E_T = 20,89 - 4,532 \cdot k_Y + 0,3269 \cdot k_Y^2 - 4,263 \cdot L_0 + 0,2757 \cdot L_0^2 + 0,4428 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,952
	$\sigma = 310,8 - 8,728 \cdot k_Y + 1,64 \cdot k_Y^2 - 68,67 \cdot L_0 + 3,827 \cdot L_0^2 + 0,3513 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,987
0,4	$E_T = 30,97 - 6,82 \cdot k_Y + 0,5433 \cdot k_Y^2 - 6,567 \cdot L_0 + 0,4105 \cdot L_0^2 + 0,6684 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,949
	$\sigma = 291,7 - 14,05 \cdot k_Y + 2,782 \cdot k_Y^2 - 63,59 \cdot L_0 + 3,534 \cdot L_0^2 + 0,3916 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,993
0,5	$E_T = 27,53 - 7,421 \cdot k_Y + 0,6906 \cdot k_Y^2 - 6,234 \cdot L_0 + 0,432 \cdot L_0^2 + 0,7889 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,936
	$\sigma = 295,8 - 27,33 \cdot k_Y + 3,875 \cdot k_Y^2 - 75,63 \cdot L_0 + 5,003 \cdot L_0^2 + 1,83 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,987
0,6	$E_T = 20,36 - 3,108 \cdot k_Y + 0,126 \cdot k_Y^2 - 5,568 \cdot L_0 + 0,4721 \cdot L_0^2 + 0,459 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,951
	$\sigma = 288,7 - 13,55 \cdot k_Y + 0,81 \cdot k_Y^2 - 88,04 \cdot L_0 + 6,824 \cdot L_0^2 + 1,474 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,998
0,2	$E_T = 18,47 - 3,505 \cdot k_Y + 0,2088 \cdot k_Y^2 - 3,311 \cdot L_0 + 0,1916 \cdot L_0^2 + 0,3037 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,98
	$\sigma = 186,6 + 6,624 \cdot k_Y + 0,624 \cdot k_Y^2 - 30,07 \cdot L_0 + 1,146 \cdot L_0^2 - 0,799 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,3	$E_T = 17,2 - 3,584 \cdot k_Y + 0,2723 \cdot k_Y^2 - 3,223 \cdot L_0 + 0,2016 \cdot L_0^2 + 0,3129 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,965
	$\sigma = 331,9 - 2,516 \cdot k_Y + 1,242 \cdot k_Y^2 - 67,38 \cdot L_0 + 3,441 \cdot L_0^2 - 0,165 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,988
0,4	$E_T = 22,95 - 5,584 \cdot k_Y + 0,4293 \cdot k_Y^2 - 4,526 \cdot L_0 + 0,2803 \cdot L_0^2 + 0,5349 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,934
	$\sigma = 311,4 - 12,09 \cdot k_Y + 2,009 \cdot k_Y^2 - 67,94 \cdot L_0 + 3,753 \cdot L_0^2 + 0,569 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,986
0,5	$E_T = 28,34 - 7,675 \cdot k_Y + 0,7142 \cdot k_Y^2 - 5,984 \cdot L_0 + 0,3857 \cdot L_0^2 + 0,7591 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,932
	$\sigma = 276,6 - 19,31 \cdot k_Y + 3,468 \cdot k_Y^2 - 64,45 \cdot L_0 + 3,881 \cdot L_0^2 + 0,7555 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,988
0,6	$E_T = 19,39 - 2,902 \cdot k_Y + 0,09631 \cdot k_Y^2 - 4,953 \cdot L_0 + 0,3936 \cdot L_0^2 + 0,4202 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,955
	$\sigma = 290,2 - 10,69 \cdot k_Y + 0,759 \cdot k_Y^2 - 81,61 \cdot L_0 + 5,825 \cdot L_0^2 + 0,9352 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,995
0,2	$E_T = 16,31 - 3,018 \cdot k_Y + 0,1686 \cdot k_Y^2 - 2,699 \cdot L_0 + 0,1489 \cdot L_0^2 + 0,242 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,994
	$\sigma = 174,4 + 10,76 \cdot k_Y + 0,212 \cdot k_Y^2 - 25,2 \cdot L_0 + 0,8431 \cdot L_0^2 - 0,914 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,3	$E_T = 20,86 - 4,35 \cdot k_Y + 0,2832 \cdot k_Y^2 - 3,673 \cdot L_0 + 0,2047 \cdot L_0^2 + 0,3704 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,965
	$\sigma = 176,5 + 1,863 \cdot k_Y + 0,795 \cdot k_Y^2 - 27,32 \cdot L_0 + 0,9765 \cdot L_0^2 - 0,381 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,998
0,4	$E_T = 25,03 - 6,051 \cdot k_Y + 0,454 \cdot k_Y^2 - 4,654 \cdot L_0 + 0,2663 \cdot L_0^2 + 0,5464 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,939
	$\sigma = 216,1 - 4,773 \cdot k_Y + 1,825 \cdot k_Y^2 - 39,45 \cdot L_0 + 1,779 \cdot L_0^2 - 0,1976 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,997
0,5	$E_T = 29,84 - 7,796 \cdot k_Y + 0,7105 \cdot k_Y^2 - 5,994 \cdot L_0 + 0,3639 \cdot L_0^2 + 0,727 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,932
	$\sigma = 239 - 13,26 \cdot k_Y + 3,172 \cdot k_Y^2 - 49,46 \cdot L_0 + 2,617 \cdot L_0^2 + 0,1024 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,993
0,6	$E_T = 25,22 - 4,878 \cdot k_Y + 0,2506 \cdot k_Y^2 - 5,878 \cdot L_0 + 0,4111 \cdot L_0^2 + 0,6058 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,939
	$\sigma = 260,9 - 12,34 \cdot k_Y + 1,33 \cdot k_Y^2 - 64,2 \cdot L_0 + 4,005 \cdot L_0^2 + 0,7678 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,994

9	0,2	$E_T = 14,66 - 2,533 \cdot k_y + 0,1251 \cdot k_y^2 - 2,284 \cdot L_0 + 0,1214 \cdot L_0^2 + 0,1922 \cdot k_y \cdot L_0$	0,994
		$\sigma = 151,1 + 12,16 \cdot k_y - 0,179 \cdot k_y^2 - 19,14 \cdot L_0 + 0,5302 \cdot L_0^2 - 0,769 \cdot k_y \cdot L_0$	0,9981
	0,3	$E_T = 17,8 - 3,409 \cdot k_y + 0,2245 \cdot k_y^2 - 2,951 \cdot L_0 + 0,1608 \cdot L_0^2 + 0,2662 \cdot k_y \cdot L_0$	0,979
		$\sigma = 214,5 + 6,39 \cdot k_y + 0,433 \cdot k_y^2 - 33,53 \cdot L_0 + 1,273 \cdot L_0^2 - 0,617 \cdot k_y \cdot L_0$	0,998
	0,4	$E_T = 20,4 - 4,692 \cdot k_y + 0,3348 \cdot k_y^2 - 3,527 \cdot L_0 + 0,1971 \cdot L_0^2 + 0,3946 \cdot k_y \cdot L_0$	0,948
		$\sigma = 291,1 - 0,3613 \cdot k_y + 1,262 \cdot k_y^2 - 53,87 \cdot L_0 + 2,503 \cdot L_0^2 - 0,39 \cdot k_y \cdot L_0$	0,991
	0,5	$E_T = 22,72 - 6,283 \cdot k_y + 0,5214 \cdot k_y^2 - 4,066 \cdot L_0 + 0,2336 \cdot L_0^2 + 0,5573 \cdot k_y \cdot L_0$	0,907
		$\sigma = 327 - 15,33 \cdot k_y + 2,397 \cdot k_y^2 - 67,76 \cdot L_0 + 3,564 \cdot L_0^2 + 0,7665 \cdot k_y \cdot L_0$	0,984
	0,6	$E_T = 24,5 - 4,661 \cdot k_y + 0,2282 \cdot k_y^2 - 5,391 \cdot L_0 + 0,3575 \cdot L_0^2 + 0,5527 \cdot k_y \cdot L_0$	0,938
		$\sigma = 255,3 - 9,654 \cdot k_y + 1,153 \cdot k_y^2 - 58,48 \cdot L_0 + 3,374 \cdot L_0^2 + 0,4986 \cdot k_y \cdot L_0$	0,995

Таблица 5.17

Уравнения регрессии для скорости $V = 1,5$ м/с

L	K_δ	Уравнение регрессии	R^2	
5	0,2	$E_T = 20,22 - 1,853 \cdot k_y + 0,04269 \cdot k_y^2 - 3,862 \cdot L_0 + 0,2435 \cdot L_0^2 + 0,1889 \cdot k_y \cdot L_0$	0,993	
		$\sigma = 297,6 - 2,209 \cdot k_y + 0,124 \cdot k_y^2 - 63,23 \cdot L_0 + 3,366 \cdot L_0^2 + 0,119 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
	0,3	$E_T = 8,017 - 0,5153 \cdot k_y + 0,0135 \cdot k_y^2 - 1,461 \cdot L_0 + 0,1358 \cdot L_0^2 + 0,04946 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 230,2 - 0,824 \cdot k_y + 0,043 \cdot k_y^2 - 52,51 \cdot L_0 + 3,011 \cdot L_0^2 + 0,033 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
	0,4	$E_T = 6,406 - 0,3204 \cdot k_y + 0,006423 \cdot k_y^2 - 1,13 \cdot L_0 + 0,1249 \cdot L_0^2 + 0,03464 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 214,2 - 1,06 \cdot k_y + 0,029 \cdot k_y^2 - 52,71 \cdot L_0 + 3,273 \cdot L_0^2 + 0,0872 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
	0,5	$E_T = 6,425 - 0,1942 \cdot k_y - 0,00323 \cdot k_y^2 - 1,253 \cdot L_0 + 0,1388 \cdot L_0^2 + 0,0397 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 178,4 - 1,557 \cdot k_y + 0,0611 \cdot k_y^2 - 45,56 \cdot L_0 + 2,97 \cdot L_0^2 + 0,0972 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
	0,6	$E_T = 6,752 - 0,275 \cdot k_y + 0,005931 \cdot k_y^2 - 1,222 \cdot L_0 + 0,1485 \cdot L_0^2 + 0,03208 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 159,3 - 0,089 \cdot k_y - 0,02 \cdot k_y^2 - 45,22 \cdot L_0 + 3,223 \cdot L_0^2 + 0,0536 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
	6	0,2	$E_T = 32,16 - 2,962 \cdot k_y + 0,03877 \cdot k_y^2 - 5,929 \cdot L_0 + 0,3218 \cdot L_0^2 + 0,295 \cdot k_y \cdot L_0$	0,973
			$\sigma = 341,7 - 2,564 \cdot k_y + 0,196 \cdot k_y^2 - 64,02 \cdot L_0 + 2,998 \cdot L_0^2 + 0,136 \cdot k_y \cdot L_0$	0,996
		0,3	$E_T = 21,55 - 2,102 \cdot k_y + 0,03179 \cdot k_y^2 - 4,044 \cdot L_0 + 0,2429 \cdot L_0^2 + 0,2265 \cdot k_y \cdot L_0$	0,987
			$\sigma = 327,2 - 2,798 \cdot k_y + 0,124 \cdot k_y^2 - 67,57 \cdot L_0 + 3,492 \cdot L_0^2 + 0,19 \cdot k_y \cdot L_0$	0,997
		0,4	$E_T = 11,34 - 0,84 \cdot k_y + 0,01991 \cdot k_y^2 - 2,181 \cdot L_0 + 0,1725 \cdot L_0^2 + 0,08767 \cdot k_y \cdot L_0$	0,997
			$\sigma = 264,1 - 2,834 \cdot k_y + 0,072 \cdot k_y^2 - 59,03 \cdot L_0 + 3,308 \cdot L_0^2 + 0,2576 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
		0,5	$E_T = 10,89 - 0,7926 \cdot k_y + 0,01695 \cdot k_y^2 - 2,158 \cdot L_0 + 0,1814 \cdot L_0^2 + 0,09367 \cdot k_y \cdot L_0$	0,997
			$\sigma = 204,7 - 1,499 \cdot k_y + 0,1006 \cdot k_y^2 - 49,34 \cdot L_0 + 3,019 \cdot L_0^2 + 0,0552 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
0,6		$E_T = 10,35 - 0,7118 \cdot k_y + 0,0153 \cdot k_y^2 - 2,097 \cdot L_0 + 0,1903 \cdot L_0^2 + 0,09107 \cdot k_y \cdot L_0$	0,997	
		$\sigma = 190,7 - 2,384 \cdot k_y + 0,049 \cdot k_y^2 - 49,55 \cdot L_0 + 3,255 \cdot L_0^2 + 0,2648 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	

7	0,2	$E_T = 28,76 - 2,995 \cdot k_Y + 0,07048 \cdot k_Y^2 - 4,822 \cdot L_0 + 0,2452 \cdot L_0^2 + 0,2598 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,992	
		$\sigma = 217,3 + 0,052 \cdot k_Y + 0,155 \cdot k_Y^2 - 32,11 \cdot L_0 + 1,128 \cdot L_0^2 - 0,065 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999	
	0,3	$E_T = 31,3 - 3,439 \cdot k_Y + 0,08713 \cdot k_Y^2 - 5,591 \cdot L_0 + 0,2978 \cdot L_0^2 + 0,3228 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,983	
		$\sigma = 277,5 - 2,164 \cdot k_Y + 0,185 \cdot k_Y^2 - 48,65 \cdot L_0 + 2,105 \cdot L_0^2 + 0,101 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999	
	0,4	$E_T = 25,32 - 3,082 \cdot k_Y + 0,06922 \cdot k_Y^2 - 4,64 \cdot L_0 + 0,2642 \cdot L_0^2 + 0,3202 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,981	
		$\sigma = 299,5 - 4,072 \cdot k_Y + 0,193 \cdot k_Y^2 - 59,86 \cdot L_0 + 2,984 \cdot L_0^2 + 0,2867 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,997	
0,5	$E_T = 15,57 - 1,424 \cdot k_Y + 0,04221 \cdot k_Y^2 - 3,066 \cdot L_0 + 0,2209 \cdot L_0^2 + 0,1469 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,994		
	$\sigma = 273,8 - 5,065 \cdot k_Y + 0,1657 \cdot k_Y^2 - 61,48 \cdot L_0 + 3,473 \cdot L_0^2 + 0,4592 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999		
0,6	$E_T = 14,84 - 1,633 \cdot k_Y + 0,06118 \cdot k_Y^2 - 2,909 \cdot L_0 + 0,2202 \cdot L_0^2 + 0,1748 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,99		
	$\sigma = 194,8 - 3,89 \cdot k_Y + 0,241 \cdot k_Y^2 - 46,35 \cdot L_0 + 2,809 \cdot L_0^2 + 0,2576 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999		
8	0,2	$E_T = 21,91 - 2,678 \cdot k_Y + 0,06355 \cdot k_Y^2 - 3,32 \cdot L_0 + 0,1634 \cdot L_0^2 + 0,2133 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,995	
		$\sigma = 192,5 + 3,988 \cdot k_Y - 0,04 \cdot k_Y^2 - 25,09 \cdot L_0 + 0,7577 \cdot L_0^2 - 0,286 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999	
	0,3	$E_T = 28,97 - 3,477 \cdot k_Y + 0,1072 \cdot k_Y^2 - 4,79 \cdot L_0 + 0,2415 \cdot L_0^2 + 0,2933 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,991	
		$\sigma = 224,4 - 0,485 \cdot k_Y + 0,234 \cdot k_Y^2 - 33,35 \cdot L_0 + 1,186 \cdot L_0^2 - 0,054 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999	
	0,4	$E_T = 34,64 - 4,285 \cdot k_Y + 0,1536 \cdot k_Y^2 - 6,192 \cdot L_0 + 0,3267 \cdot L_0^2 + 0,3894 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,985	
		$\sigma = 294,2 - 6,597 \cdot k_Y + 0,591 \cdot k_Y^2 - 52,1 \cdot L_0 + 2,298 \cdot L_0^2 + 0,3624 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,995	
	0,5	$E_T = 27,22 - 4,069 \cdot k_Y + 0,1292 \cdot k_Y^2 - 4,89 \cdot L_0 + 0,2722 \cdot L_0^2 + 0,4108 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,971	
		$\sigma = 337,1 - 10,33 \cdot k_Y + 0,4758 \cdot k_Y^2 - 69,38 \cdot L_0 + 3,589 \cdot L_0^2 + 0,85 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,998	
	0,6	$E_T = 19,78 - 2,65 \cdot k_Y + 0,09722 \cdot k_Y^2 - 3,764 \cdot L_0 + 0,247 \cdot L_0^2 + 0,2792 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,98	
		$\sigma = 264,9 - 10,11 \cdot k_Y + 0,424 \cdot k_Y^2 - 59,74 \cdot L_0 + 3,404 \cdot L_0^2 + 0,9381 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,998	
	9	0,2	$E_T = 25,37 - 3,386 \cdot k_Y + 0,1314 \cdot k_Y^2 - 3,587 \cdot L_0 + 0,161 \cdot L_0^2 + 0,2358 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,989
			$\sigma = 180,7 + 3,662 \cdot k_Y + 0,25 \cdot k_Y^2 - 20,86 \cdot L_0 + 0,5451 \cdot L_0^2 - 0,27 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,3		$E_T = 30,87 - 4,689 \cdot k_Y + 0,2376 \cdot k_Y^2 - 4,65 \cdot L_0 + 0,2146 \cdot L_0^2 + 0,3405 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,989	
		$\sigma = 183,8 + 0,193 \cdot k_Y + 1,009 \cdot k_Y^2 - 23,23 \cdot L_0 + 0,681 \cdot L_0^2 - 0,316 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,998	
0,4		$E_T = 34,87 - 6,033 \cdot k_Y + 0,3525 \cdot k_Y^2 - 5,576 \cdot L_0 + 0,2686 \cdot L_0^2 + 0,4659 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,962	
		$\sigma = 308,6 - 10,59 \cdot k_Y + 1,834 \cdot k_Y^2 - 50,05 \cdot L_0 + 2,045 \cdot L_0^2 + 0,3336 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,991	
0,5		$E_T = 29,33 - 4,082 \cdot k_Y + 0,1119 \cdot k_Y^2 - 5,172 \cdot L_0 + 0,2759 \cdot L_0^2 + 0,4029 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,973	
		$\sigma = 283 - 5,844 \cdot k_Y + 0,3749 \cdot k_Y^2 - 51,94 \cdot L_0 + 2,367 \cdot L_0^2 + 0,3644 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,996	
0,6		$E_T = 19,33 - 2,452 \cdot k_Y + 0,0706 \cdot k_Y^2 - 3,598 \cdot L_0 + 0,2287 \cdot L_0^2 + 0,2623 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,984	
		$\sigma = 315,9 - 10,02 \cdot k_Y + 0,394 \cdot k_Y^2 - 68,64 \cdot L_0 + 3,761 \cdot L_0^2 + 0,8842 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999	

Уравнения регрессии для скорости $V = 2$ м/с

L	K_0	Уравнение регрессии	R^2	
5	0,2	$E_T = 13,28 - 0,6143 \cdot k_V + 0,01256 \cdot k_V^2 - 1,979 \cdot L_0 + 0,1314 \cdot L_0^2 + 0,0471 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 208,2 - 0,31 \cdot k_V + 0,013 \cdot k_V^2 - 39,15 \cdot L_0 + 1,857 \cdot L_0^2 + 0,011 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
	0,3	$E_T = 7,962 - 0,2547 \cdot k_V + 0,005857 \cdot k_V^2 - 1,036 \cdot L_0 + 0,09979 \cdot L_0^2 + 0,01259 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 181,7 + 0,378 \cdot k_V - 0,02 \cdot k_V^2 - 36,59 \cdot L_0 + 1,823 \cdot L_0^2 + 0,016 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
	0,4	$E_T = 6,424 - 0,2088 \cdot k_V + 0,004149 \cdot k_V^2 - 0,543 \cdot L_0 + 0,08046 \cdot L_0^2 + 0,004844 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 163,7 - 0,278 \cdot k_V + 0,01 \cdot k_V^2 - 33,52 \cdot L_0 + 1,786 \cdot L_0^2 - 0,017 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
	0,5	$E_T = 6,749 - 0,1774 \cdot k_V + 0,002966 \cdot k_V^2 - 0,598 \cdot L_0 + 0,08778 \cdot L_0^2 + 0,004648 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 153,4 - 0,338 \cdot k_V + 0,0069 \cdot k_V^2 - 33,06 \cdot L_0 + 1,854 \cdot L_0^2 + 0,0012 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
	0,6	$E_T = 7,191 - 0,1435 \cdot k_V + 0,00192 \cdot k_V^2 - 0,7112 \cdot L_0 + 0,0997 \cdot L_0^2 + 0,005092 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 142,2 + 0,0292 \cdot k_V - 0,00343 \cdot k_V^2 - 33,97 \cdot L_0 + 2,021 \cdot L_0^2 + 0,0216 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
	6	0,2	$E_T = 13,92 - 0,9494 \cdot k_V + 0,02838 \cdot k_V^2 - 1,917 \cdot L_0 + 0,1177 \cdot L_0^2 + 0,06109 \cdot k_V \cdot L_0$	0,998
			$\sigma = 244,2 - 0,86 \cdot k_V + 0,011 \cdot k_V^2 - 41,61 \cdot L_0 + 1,77 \cdot L_0^2 + 0,067 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999
0,3		$E_T = 7,377 - 0,2398 \cdot k_V + 0,000937 \cdot k_V^2 - 1,009 \cdot L_0 + 0,08746 \cdot L_0^2 + 0,02432 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 211 - 0,686 \cdot k_V + 0,022 \cdot k_V^2 - 38,15 \cdot L_0 + 1,739 \cdot L_0^2 + 0,03 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
0,4		$E_T = 6,448 - 0,2574 \cdot k_V + 0,006789 \cdot k_V^2 - 0,6381 \cdot L_0 + 0,08163 \cdot L_0^2 + 0,00648 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 195,3 - 0,374 \cdot k_V + 0,007 \cdot k_V^2 - 38,19 \cdot L_0 + 1,893 \cdot L_0^2 + 0,0196 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
0,5		$E_T = 6,335 - 0,1882 \cdot k_V + 0,003497 \cdot k_V^2 - 0,6339 \cdot L_0 + 0,08307 \cdot L_0^2 + 0,008628 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 166,7 - 0,592 \cdot k_V + 0,0183 \cdot k_V^2 - 33,68 \cdot L_0 + 1,777 \cdot L_0^2 - 0,004 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
0,6		$E_T = 6,342 - 0,1923 \cdot k_V + 0,004154 \cdot k_V^2 - 0,5149 \cdot L_0 + 0,08362 \cdot L_0^2 + 0,004776 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 145,8 + 0,0185 \cdot k_V - 0,0046 \cdot k_V^2 - 32,52 \cdot L_0 + 1,817 \cdot L_0^2 + 0,0184 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
7		0,2	$E_T = 19,41 - 1,453 \cdot k_V + 0,02964 \cdot k_V^2 - 2,724 \cdot L_0 + 0,1396 \cdot L_0^2 + 0,1063 \cdot k_V \cdot L_0$	0,996
			$\sigma = 294,9 - 0,881 \cdot k_V + 0,03 \cdot k_V^2 - 45,24 \cdot L_0 + 1,72 \cdot L_0^2 - 0,04 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999
	0,3	$E_T = 16,52 - 1,075 \cdot k_V + 0,02283 \cdot k_V^2 - 2,424 \cdot L_0 + 0,1388 \cdot L_0^2 + 0,08228 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 248,1 - 1,669 \cdot k_V + 0,055 \cdot k_V^2 - 41,13 \cdot L_0 + 1,707 \cdot L_0^2 + 0,093 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
	0,4	$E_T = 7,05 - 0,3994 \cdot k_V + 0,01221 \cdot k_V^2 - 0,8002 \cdot L_0 + 0,07845 \cdot L_0^2 + 0,02128 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 204,2 + 0,059 \cdot k_V - 0,01 \cdot k_V^2 - 37,25 \cdot L_0 + 1,698 \cdot L_0^2 + 0,076 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
	0,5	$E_T = 6,955 - 0,2327 \cdot k_V + 0,005429 \cdot k_V^2 - 0,8557 \cdot L_0 + 0,09106 \cdot L_0^2 + 0,01292 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 186,4 - 0,529 \cdot k_V + 0,0051 \cdot k_V^2 - 36,33 \cdot L_0 + 1,785 \cdot L_0^2 + 0,0464 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
	0,6	$E_T = 6,143 - 0,1432 \cdot k_V + 0,00212 \cdot k_V^2 - 0,7037 \cdot L_0 + 0,08698 \cdot L_0^2 + 0,01192 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	
		$\sigma = 155,1 + 0,0875 \cdot k_V - 0,0057 \cdot k_V^2 - 32,91 \cdot L_0 + 1,757 \cdot L_0^2 + 0,0044 \cdot k_V \cdot L_0$	0,999	

8	0,2	$E_T = 40,15 - 3,382 \cdot k_y + 0,0679 \cdot k_y^2 - 5,575 \cdot L_0 + 0,2314 \cdot L_0^2 + 0,2414 \cdot k_y \cdot L_0$	0,988
		$\sigma = 288,5 - 1,168 \cdot k_y + 0,063 \cdot k_y^2 - 39,06 \cdot L_0 + 1,301 \cdot L_0^2 + 0,055 \cdot k_y \cdot L_0$	0,998
	0,3	$E_T = 22,65 - 1,849 \cdot k_y + 0,0255 \cdot k_y^2 - 3,209 \cdot L_0 + 0,155 \cdot L_0^2 + 0,1491 \cdot k_y \cdot L_0$	0,996
		$\sigma = 296,5 - 1,505 \cdot k_y + 0,048 \cdot k_y^2 - 45,2 \cdot L_0 + 1,707 \cdot L_0^2 + 0,083 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
	0,4	$E_T = 9,168 - 0,5272 \cdot k_y + 0,009114 \cdot k_y^2 - 1,23 \cdot L_0 + 0,09022 \cdot L_0^2 + 0,04272 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
		$\sigma = 238,3 - 0,136 \cdot k_y - 0,01 \cdot k_y^2 - 40,59 \cdot L_0 + 1,721 \cdot L_0^2 + 0,0192 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
0,5	$E_T = 8,81 - 0,3934 \cdot k_y + 0,008343 \cdot k_y^2 - 1,201 \cdot L_0 + 0,09857 \cdot L_0^2 + 0,03022 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
	$\sigma = 204,9 - 1,189 \cdot k_y + 0,048 \cdot k_y^2 - 37,35 \cdot L_0 + 1,731 \cdot L_0^2 + 0,0424 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
0,6	$E_T = 5,846 - 0,2067 \cdot k_y + 0,004394 \cdot k_y^2 - 0,5924 \cdot L_0 + 0,07581 \cdot L_0^2 + 0,01474 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
	$\sigma = 154,4 + 0,2308 \cdot k_y - 0,0063 \cdot k_y^2 - 30,88 \cdot L_0 + 1,551 \cdot L_0^2 - 0,015 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
9	0,2	$E_T = 27,19 - 3,282 \cdot k_y + 0,06878 \cdot k_y^2 - 3,286 \cdot L_0 + 0,1316 \cdot L_0^2 + 0,217 \cdot k_y \cdot L_0$	0,992
		$\sigma = 168,1 + 1,924 \cdot k_y + 0,017 \cdot k_y^2 - 17,09 \cdot L_0 + 0,3677 \cdot L_0^2 - 0,145 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
	0,3	$E_T = 46,67 - 4,832 \cdot k_y + 0,12 \cdot k_y^2 - 6,391 \cdot L_0 + 0,2561 \cdot L_0^2 + 0,344 \cdot k_y \cdot L_0$	0,989
		$\sigma = 193 - 0,023 \cdot k_y + 0,103 \cdot k_y^2 - 23,06 \cdot L_0 + 0,629 \cdot L_0^2 - 0,075 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
	0,4	$E_T = 14,65 - 0,8241 \cdot k_y + 0,0187 \cdot k_y^2 - 2,194 \cdot L_0 + 0,1312 \cdot L_0^2 + 0,05902 \cdot k_y \cdot L_0$	0,998
		$\sigma = 300,3 - 1,312 \cdot k_y + 0,051 \cdot k_y^2 - 47,7 \cdot L_0 + 1,893 \cdot L_0^2 + 0,0568 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
0,5	$E_T = 10,78 - 0,5077 \cdot k_y + 0,005011 \cdot k_y^2 - 1,607 \cdot L_0 + 0,1124 \cdot L_0^2 + 0,04818 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
	$\sigma = 232,5 - 0,843 \cdot k_y + 0,0337 \cdot k_y^2 - 40,75 \cdot L_0 + 1,798 \cdot L_0^2 + 0,032 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
0,6	$E_T = 8,199 - 0,3612 \cdot k_y + 0,007949 \cdot k_y^2 - 1,065 \cdot L_0 + 0,09601 \cdot L_0^2 + 0,02776 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
	$\sigma = 179,7 + 0,0647 \cdot k_y + 0,0143 \cdot k_y^2 - 34,72 \cdot L_0 + 1,71 \cdot L_0^2 - 0,046 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	

Таблица 5.19

Уравнения регрессии для скорости $V = 2,5$ м/с

L	K_δ	Уравнение регрессии	R^2
5	0,2	$E_T = 11,57 - 0,359 \cdot k_y + 0,0052 \cdot k_y^2 - 0,906 \cdot L_0 + 0,074 \cdot L_0^2 + 0,009 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
		$\sigma = 165,6 + 0,442 \cdot k_y - 0,005 \cdot k_y^2 - 28,21 \cdot L_0 + 1,197 \cdot L_0^2 - 0,0176 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
	0,3	$E_T = 6,95 - 0,082 \cdot k_y + 0,0006 \cdot k_y^2 - 0,6 \cdot L_0 + 0,068 \cdot L_0^2 + 0,0037 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
		$\sigma = 150 + 0,443 \cdot k_y - 0,004 \cdot k_y^2 - 27,36 \cdot L_0 + 1,223 \cdot L_0^2 - 0,013 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
	0,4	$E_T = 5,865 - 0,02 \cdot k_y - 0,00001 \cdot k_y^2 - 0,585 \cdot L_0 + 0,073 \cdot L_0^2 + 0,0024 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
		$\sigma = 187,7 - 1,642 \cdot k_y + 0,0177 \cdot k_y^2 - 26,75 \cdot L_0 + 1,255 \cdot L_0^2 - 0,0088 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
0,5	$E_T = 7,453 - 0,065 \cdot k_y + 0,0003 \cdot k_y^2 - 0,464 \cdot L_0 + 0,069 \cdot L_0^2 + 0,002 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
	$\sigma = 158,2 - 0,2766 \cdot k_y + 0,0017 \cdot k_y^2 - 28,68 \cdot L_0 + 1,421 \cdot L_0^2 + 0,0012 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
0,6	$E_T = 10,64 - 0,0984 \cdot k_y + 0,00035 \cdot k_y^2 - 0,3265 \cdot L_0 + 0,0658 \cdot L_0^2 + 0,0011 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	
	$\sigma = 142,3 - 0,1368 \cdot k_y + 0,0006 \cdot k_y^2 - 27,41 \cdot L_0 + 1,45 \cdot L_0^2 - 0,0012 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999	

0,2	$E_T = 9,74 - 0,2497 \cdot k_Y + 0,00443 \cdot k_Y^2 - 1,023 \cdot L_0 + 0,078 \cdot L_0^2 + 0,00877 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 187,3 + 0,049 \cdot k_Y - 0,0057 \cdot k_Y^2 - 28,59 \cdot L_0 + 1,083 \cdot L_0^2 + 0,0136 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,3	$E_T = 6,482 - 0,183 \cdot k_Y + 0,0029 \cdot k_Y^2 - 0,3646 \cdot L_0 + 0,055 \cdot L_0^2 + 0,003 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 165,7 - 0,039 \cdot k_Y + 0,0017 \cdot k_Y^2 - 26,25 \cdot L_0 + 1,057 \cdot L_0^2 - 0,0052 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,4	$E_T = 4,6 + 0,007 \cdot k_Y - 0,0004 \cdot k_Y^2 - 0,4877 \cdot L_0 + 0,064 \cdot L_0^2 + 0,003 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 171,6 - 0,156 \cdot k_Y + 0,0017 \cdot k_Y^2 - 29,14 \cdot L_0 + 1,274 \cdot L_0^2 + 0,0024 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,5	$E_T = 4,642 - 0,006 \cdot k_Y - 0,0001 \cdot k_Y^2 - 0,38 \cdot L_0 + 0,06 \cdot L_0^2 + 0,002 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 112,4 + 1,323 \cdot k_Y - 0,0114 \cdot k_Y^2 - 26,21 \cdot L_0 + 1,258 \cdot L_0^2 - 0,02 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,6	$E_T = 6,974 - 0,073 \cdot k_Y + 0,0004 \cdot k_Y^2 - 0,3264 \cdot L_0 + 0,0637 \cdot L_0^2 + 0,0015 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 137,3 - 0,08 \cdot k_Y + 0,00057 \cdot k_Y^2 - 25,86 \cdot L_0 + 1,269 \cdot L_0^2 - 0,0001 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,2	$E_T = 10,98 - 0,376 \cdot k_Y + 0,00456 \cdot k_Y^2 - 1,217 \cdot L_0 + 0,0755 \cdot L_0^2 + 0,024 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 216,6 - 0,3354 \cdot k_Y - 0,016 \cdot k_Y^2 - 30,46 \cdot L_0 + 1,054 \cdot L_0^2 + 0,055 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,3	$E_T = 8,95 - 0,2 \cdot k_Y + 0,0008 \cdot k_Y^2 - 0,99 \cdot L_0 + 0,0725 \cdot L_0^2 + 0,016 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 194,3 - 0,332 \cdot k_Y + 0,019 \cdot k_Y^2 - 28,99 \cdot L_0 + 1,119 \cdot L_0^2 - 0,0244 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,4	$E_T = 7,086 - 0,245 \cdot k_Y + 0,004 \cdot k_Y^2 - 0,384 \cdot L_0 + 0,053 \cdot L_0^2 + 0,006 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 170,7 - 0,1163 \cdot k_Y + 0,0023 \cdot k_Y^2 - 27,1 \cdot L_0 + 1,092 \cdot L_0^2 + 0,0004 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,5	$E_T = 8,446 - 0,245 \cdot k_Y + 0,0038 \cdot k_Y^2 - 0,446 \cdot L_0 + 0,064 \cdot L_0^2 + 0,002 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 168 - 0,6843 \cdot k_Y + 0,0097 \cdot k_Y^2 - 27,06 \cdot L_0 + 1,16 \cdot L_0^2 + 0,01 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,6	$E_T = 8,321 - 0,181 \cdot k_Y + 0,0019 \cdot k_Y^2 - 0,392 \cdot L_0 + 0,06 \cdot L_0^2 + 0,0038 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 136,8 - 0,0024 \cdot k_Y + 0,00057 \cdot k_Y^2 - 24,87 \cdot L_0 + 1,161 \cdot L_0^2 - 0,0052 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,2	$E_T = 6,871 - 0,218 \cdot k_Y + 0,005 \cdot k_Y^2 - 0,869 \cdot L_0 + 0,068 \cdot L_0^2 + 0,0135 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 242,1 + 0,1227 \cdot k_Y - 0,0074 \cdot k_Y^2 - 31,76 \cdot L_0 + 1,033 \cdot L_0^2 - 0,0064 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,3	$E_T = 7,135 - 0,2285 \cdot k_Y + 0,003 \cdot k_Y^2 - 0,711 \cdot L_0 + 0,06 \cdot L_0^2 + 0,01355 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 216,4 - 0,047 \cdot k_Y - 0,0171 \cdot k_Y^2 - 30,68 \cdot L_0 + 1,07 \cdot L_0^2 + 0,368 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,4	$E_T = 8,342 - 0,25 \cdot k_Y + 0,0046 \cdot k_Y^2 - 0,798 \cdot L_0 + 0,068 \cdot L_0^2 + 0,0098 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 187,5 + 0,011 \cdot k_Y - 0,003 \cdot k_Y^2 - 28,54 \cdot L_0 + 1,087 \cdot L_0^2 + 0,006 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,5	$E_T = 8,312 - 0,294 \cdot k_Y + 0,00535 \cdot k_Y^2 - 0,51 \cdot L_0 + 0,061 \cdot L_0^2 + 0,0056 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 162,6 + 0,026 \cdot k_Y + 0,0017 \cdot k_Y^2 - 26,39 \cdot L_0 + 1,093 \cdot L_0^2 - 0,012 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,6	$E_T = 6,71 - 0,174 \cdot k_Y + 0,0024 \cdot k_Y^2 - 0,268 \cdot L_0 + 0,053 \cdot L_0^2 + 0,0037 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 157,2 - 0,8174 \cdot k_Y + 0,0137 \cdot k_Y^2 - 25,31 \cdot L_0 + 1,118 \cdot L_0^2 + 0,0004 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999
0,2	$E_T = 41,12 - 3,01 \cdot k_Y + 0,043 \cdot k_Y^2 - 4,81 \cdot L_0 + 0,173 \cdot L_0^2 + 0,19 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,992
	$\sigma = 265,2 - 0,81 \cdot k_Y + 0,02 \cdot k_Y^2 - 30,49 \cdot L_0 + 0,8488 \cdot L_0^2 + 0,038 \cdot k_Y \cdot L_0$	0,999

0,3	$E_T = 7,13 - 0,333 \cdot k_y + 0,0084 \cdot k_y^2 - 0,784 \cdot L_0 + 0,0615 \cdot L_0^2 + 0,019 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 277,7 - 0,81 \cdot k_y + 0,02 \cdot k_y^2 - 30,49 \cdot L_0 + 0,8488 \cdot L_0^2 + 0,038 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
0,4	$E_T = 10,74 - 0,43 \cdot k_y + 0,0063 \cdot k_y^2 - 1,173 \cdot L_0 + 0,075 \cdot L_0^2 + 0,027 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 208,9 + 0,012 \cdot k_y - 0,0154 \cdot k_y^2 - 30,1 \cdot L_0 + 1,077 \cdot L_0^2 + 0,021 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
0,5	$E_T = 8,79 - 0,287 \cdot k_y + 0,005 \cdot k_y^2 - 0,829 \cdot L_0 + 0,069 \cdot L_0^2 + 0,013 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 187,7 - 0,7047 \cdot k_y + 0,0166 \cdot k_y^2 - 28,63 \cdot L_0 + 1,118 \cdot L_0^2 + 0,0196 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
0,6	$E_T = 6,537 - 0,197 \cdot k_y + 0,0033 \cdot k_y^2 - 0,354 \cdot L_0 + 0,0534 \cdot L_0^2 + 0,0068 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999
	$\sigma = 136,3 + 0,717 \cdot k_y - 0,0126 \cdot k_y^2 - 23,69 \cdot L_0 + 1,007 \cdot L_0^2 - 0,0212 \cdot k_y \cdot L_0$	0,999

В результате проведенной оптимизации были получены оптимальные значения коэффициента усиления и выноса точки копирования для различных значений длины базы, коэффициента базы и скорости (таблицы 5.20-5.29).

Таблица 5.20

Оптимальные значения коэффициента усиления K_y ($V = 0,5$ м/с)

$L \backslash K_b$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
5	1,86	1,91	2,03	2,05	2,51
6	1,78	1,82	1,96	2,01	2,35
7	1,63	1,81	1,9	1,93	2,22
8	1,62	1,74	1,82	1,97	1,99
9	1,5	1,73	1,85	1,95	1,99

Таблица 5.21

Оптимальные значения выноса точки копирования L_0 ($V = 0,5$ м/с)

$L \backslash K_b$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
5	5,78	5,19	4,62	4,07	3,98
6	6,68	5,98	5,27	4,62	4,46
7	7,58	6,74	5,93	5,13	4,52
8	8,47	7,53	6,58	5,66	4,82
9	9,33	8,28	7,23	6,18	5,22

Таблица 5.22

Оптимальные значения коэффициента усиления K_V ($V = 1$ м/с)

$L \backslash K_{\delta}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
5	2,54	1,95	2,25	2,51	3,01
6	2	2,05	2,05	2,17	2,53
7	1,66	1,87	2,08	2,06	2,43
8	1,38	1,72	1,85	1,97	2,21
9	1,01	1,6	1,81	2,04	2,11

Таблица 5.23

Оптимальные значения выноса точки копирования L_0 ($V = 1$ м/с)

$L \backslash K_{\delta}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
5	6,91	6,79	5,59	4,88	4,34
6	7,98	7,13	6,89	5,64	4,85
7	8,97	8,03	7,13	6,27	5,35
8	9,94	8,95	7,91	6,91	5,92
9	10,8	9,79	8,64	7,49	6,43

Таблица 5.24

Оптимальные значения коэффициента усиления K_V ($V = 1,5$ м/с)

$L \backslash K_{\delta}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
5	3,84	6,58	7,03	7,73	8,46
6	2,7	3,63	5,8	6,24	7,72
7	2,31	3,41	3,84	4,92	5,3
8	2,17	2,56	2,94	3,19	3,7
9	1,66	1,96	2,15	2,89	3,56

Таблица 5.25

Оптимальные значения выноса точки копирования L_0 ($V = 1,5$ м/с)

$L \backslash K_6$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
5	7,45	6,84	6,29	5,82	5,34
6	8,65	7,75	6,96	6,35	5,78
7	9,87	8,83	7,81	6,88	6,21
8	10,99	9,85	8,7	7,57	6,62
9	12,04	10,8	9,53	8,29	7,07

Таблица 5.26

Оптимальные значения коэффициента усиления K_V ($V = 2$ м/с)

$L \backslash K_6$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
5	7,24	13,33	20,84	24,55	28,96
6	6,82	8,73	15,19	17,53	19,26
7	4,88	5,61	8,95	12,1	12,9
8	3,95	4,63	7,28	8,43	10,82
9	3,66	3,79	6,26	6,88	8,8

Таблица 5.27

Оптимальные значения выноса точки копирования L_0 ($V = 2$ м/с)

$L \backslash K_6$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
5	8,35	7,85	7,34	6,86	6,36
6	9,22	8,55	7,93	7,35	6,78
7	10,28	9,35	8,57	7,86	7,19
8	11,54	10,31	9,25	8,38	7,59
9	12,82	11,42	10,01	8,91	7,99

Таблица 5.28

Оптимальные значения коэффициента усиления $K_y (V = 2,5 \text{ м/с})$

$L \backslash K_{\delta}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
5	26,42	39,53	49,24	78,67	126,22
6	18,11	26,55	39,48	49,49	68,33
7	10,55	15,58	23,6	30,04	39,67
8	5,57	12,25	16,49	22,57	29,43
9	3,88	6,54	9,11	15,59	20,35

Таблица 5.29

Оптимальные значения выноса точки копирования $L_0 (V = 2,5 \text{ м/с})$

$L \backslash K_{\delta}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
5	9,4	8,91	8,41	7,9	7,35
6	10,2	9,61	9	8,41	7,81
7	11,04	10,3	9,6	8,94	8,22
8	11,98	11,04	10,2	9,42	8,64
9	13,16	11,84	10,85	9,9	9,04

Графики полученных оптимальных значений коэффициента усиления и выноса точки копирования представлены на рисунках 5.4.54, 5.4.55.

Полученные зависимости оптимальных значений коэффициента усиления и выноса точки копирования от длины базы и коэффициента базы были аппроксимированы уравнениями, представленными в таблице 5.30.

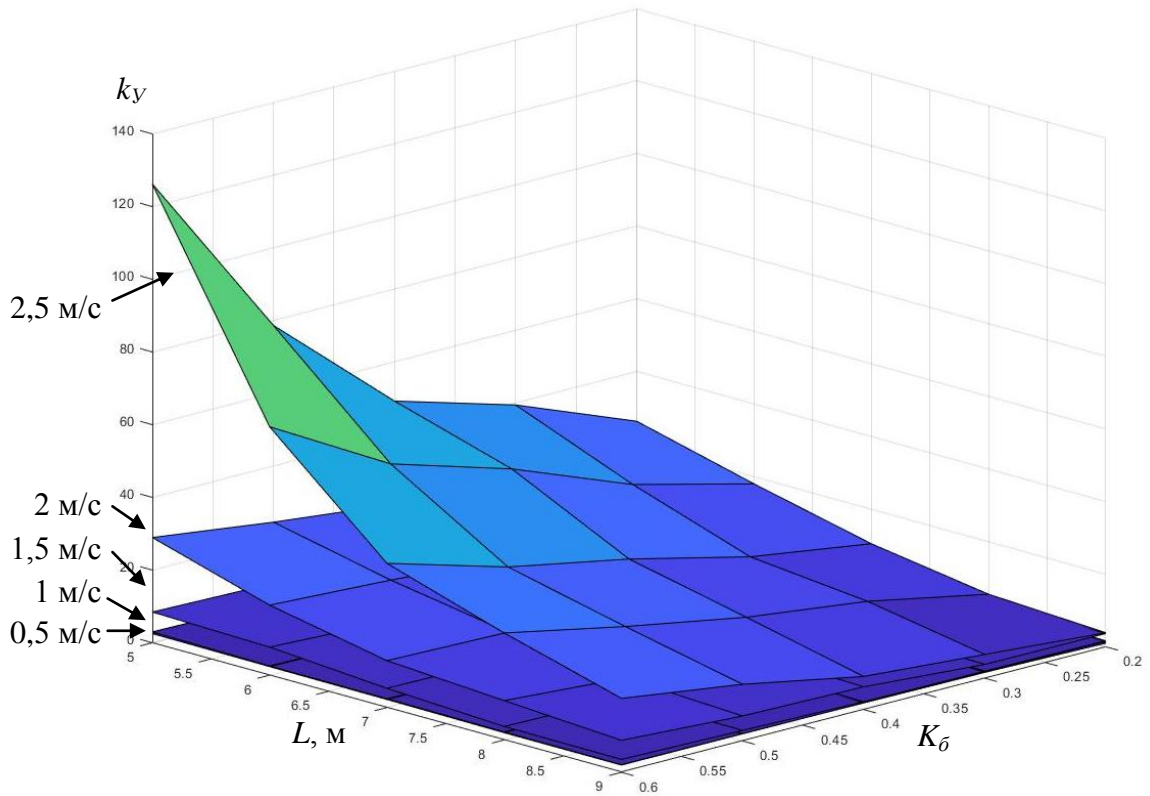


Рисунок 5.4.54 – Зависимости оптимального значения коэффициента усиления k_y при различных значениях скорости V , длины базы L и коэффициента базы K_b

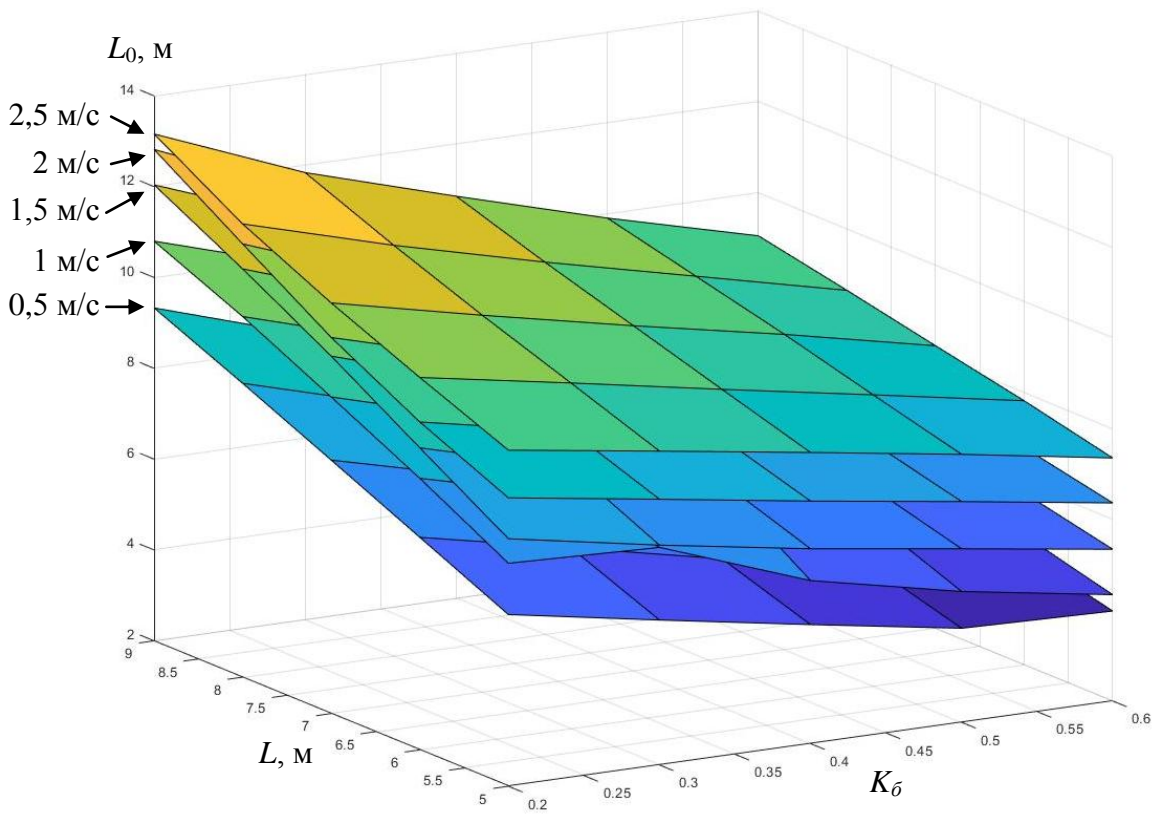


Рисунок 5.4.55 – Зависимости оптимального значения выноса точки копирования L_0 при различных значениях скорости V , длины базы L и коэффициента базы K_b

Уравнения регрессии оптимальных значений коэффициента усиления
и выноса точки копирования

$V, \text{ м/с}$	Уравнение	R^2
0,5	$k_y = 1,902 + 1,248 \cdot K_{\sigma} - 0,0692 \cdot L$	0,882
	$L_0 = 4,304 - 8,2 \cdot K_{\sigma} + 0,71 \cdot L$	0,941
1	$k_y = 2,585 + 1,792 \cdot K_{\sigma} - 0,181 \cdot L$	0,817
	$L_0 = 5,491 - 8,2 \cdot K_{\sigma} + 0,71 \cdot L$	0,973
1,5	$k_y = 8,747 + 7,79 \cdot K_{\sigma} - 1,087 \cdot L$	0,899
	$L_0 = 6,242 - 8,2 \cdot K_{\sigma} + 0,71 \cdot L$	0,944
2	$k_y = 22,4 + 28,36 \cdot K_{\sigma} - 3,27 \cdot L$	0,844
	$L_0 = 7,032 - 8,2 \cdot K_{\sigma} + 0,71 \cdot L$	0,941
2,5	$k_y = 78,82 + 107 \cdot K_{\sigma} - 12,9 \cdot L$	0,881
	$L_0 = 7,957 - 8,2 \cdot K_{\sigma} + 0,71 \cdot L$	0,952

Полученные зависимости коэффициента усиления можно представить в следующем виде:

$$k_y = a_0 + a_1 \cdot K_{\sigma} + a_2 \cdot L. \quad (5.4.1)$$

Коэффициенты a_0 , a_1 , a_2 зависят от скорости движения ДСМ, и эти зависимости были аппроксимированы уравнениями, представленными в таблице 5.31.

Таблица 5.31

Уравнения регрессии коэффициентов уравнения регрессии коэффициента усиления

Уравнение	R^2
$a_0 = 1,7856 \cdot V^5 + 1,247$	0,9953
$a_1 = 1,085 \cdot V^5 - 0,7772$	0,9949
$a_2 = -0,1308 \cdot V^5 + 0,1154$	0,9931

В результате подстановки была получена итоговая функциональная зависимость коэффициента усиления от длины базы, коэффициента базы и скорости ДСМ

$$k_y = V^5(1,7856 + 1,085 \cdot K_{\sigma} - 0,1308 \cdot L) + (1,247 - 0,7772 \cdot K_{\sigma} + 0,1154 \cdot L) \quad (5.4.2)$$

или в обобщенном виде:

$$k_y = a \cdot V^5 + b, \quad (5.4.3)$$

где $a = 1,7856 + 1,085 \cdot K_\phi - 0,1308 \cdot L$, $b = 1,247 - 0,7772 \cdot K_\phi + 0,1154 \cdot L$.

Полученные зависимости выноса точки копирования можно представить в следующем виде:

$$L_0 = b_0 - 8,2 \cdot K_\phi + 0,71 \cdot L. \quad (5.4.4)$$

Коэффициент a_0 зависит от скорости движения ДСМ, и эта зависимость была аппроксимирована с высокой точностью ($R^2 = 0,993$) уравнением:

$$b_0 = 1,77 \cdot V + 3,55. \quad (5.4.5)$$

В результате подстановки была получена итоговая функциональная зависимость выноса точки копирования от длины базы, коэффициента базы и скорости ДСМ

$$L_0 = 1,77 \cdot V + (3,55 - 8,2 \cdot K_\phi + 0,71 \cdot L). \quad (5.4.6)$$

или в обобщенном виде

$$L_0 = c \cdot V + d, \quad (5.4.7)$$

где $c = 1,77$, $d = 3,55 - 8,2 \cdot K_\phi + 0,71 \cdot L$.

Таким образом, в результате проведенных исследований был предложен новый копирный метод управления автогрейдером, оптимальные значения настройки которого представлены функциональными зависимостями (5.4.3) и (5.4.7).

5.5. Сравнение эффективности методов

Результатом исследований, приведенных выше, стали методы управления, адаптированные для автономного управления автогрейдером и новый предложенный копирный метод управления. Завершающим этапом исследований, показывающим эффективность предложенного метода, является сравнение методов по критерию эффективности [192].

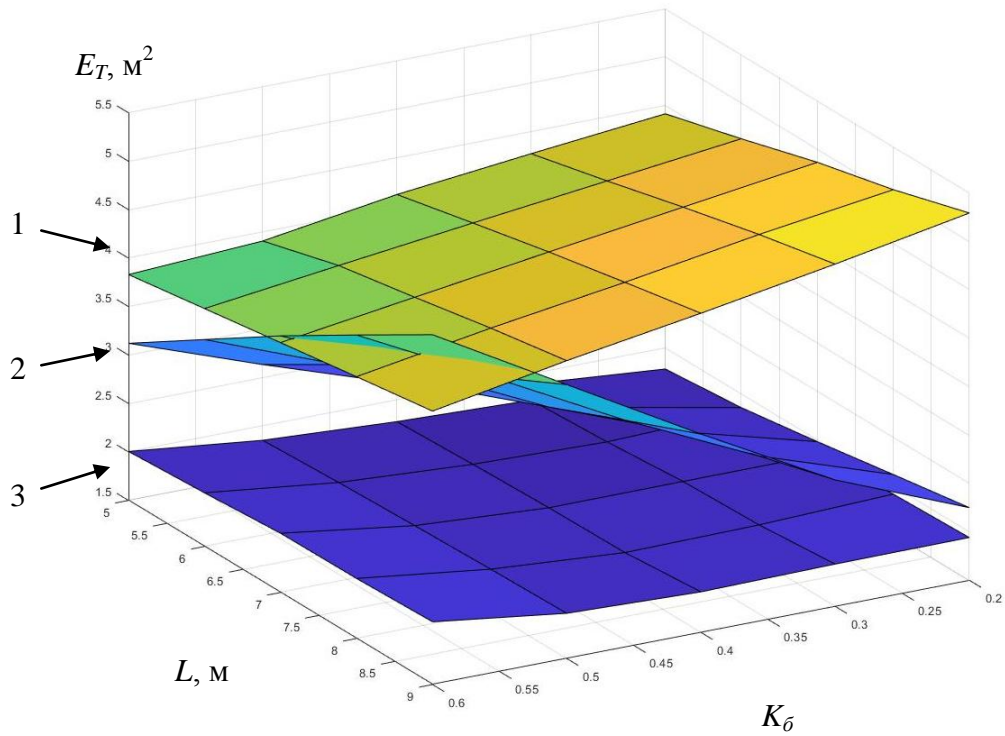


Рисунок 5.5.1 – Зависимости интегрального критерия различных методов управления от длины базы L_b и коэффициента базы K_b ($V = 0,5$ м/с)
 1 – метод Стэнли; 2 – метод «чистое преследование»; 3 – копирный метод.

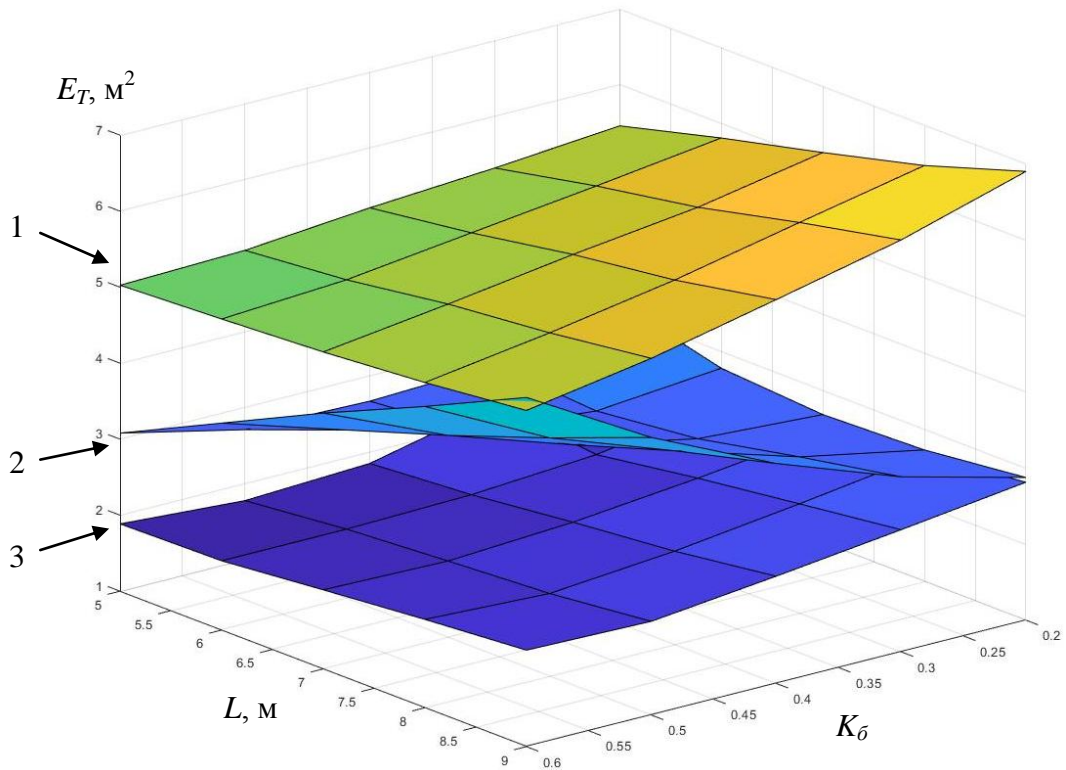


Рисунок 5.5.2 – Зависимости интегрального критерия различных методов управления от длины базы L_b и коэффициента базы K_b ($V = 1$ м/с)
 1 – метод Стэнли; 2 – метод «чистое преследование»; 3 – копирный метод.

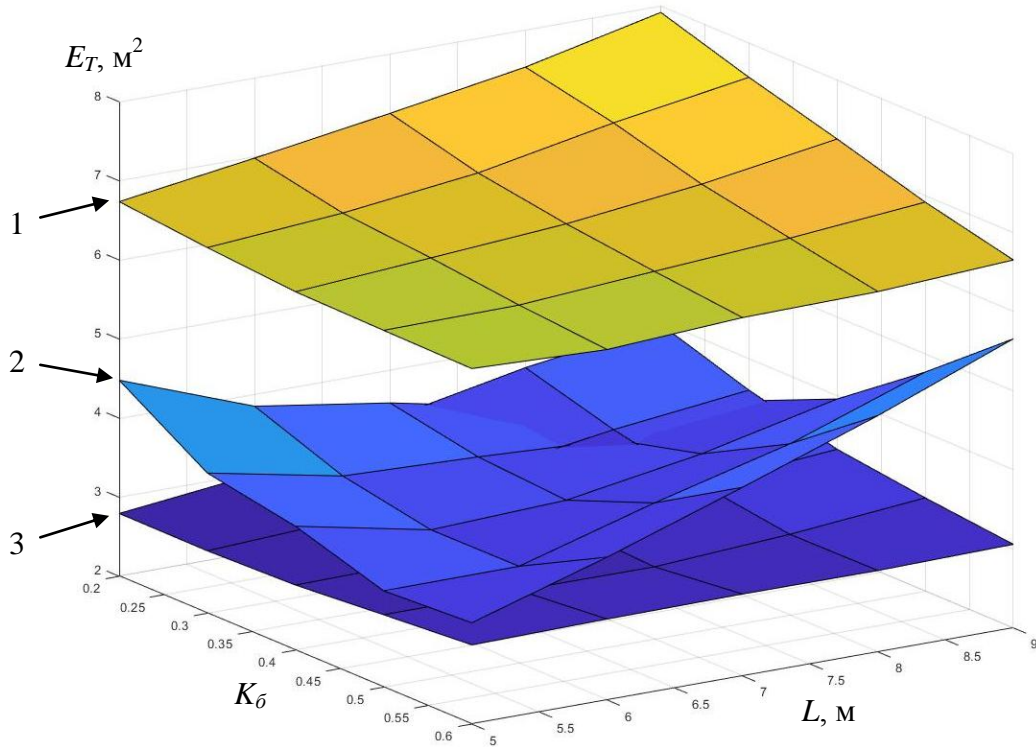


Рисунок 5.5.3 – Зависимости интегрального критерия различных методов управления от длины базы L_b и коэффициента базы K_b ($V = 1,5 \text{ м/с}$)
 1 – метод Стэнли; 2 – метод «чистое преследование»; 3 – копирный метод.

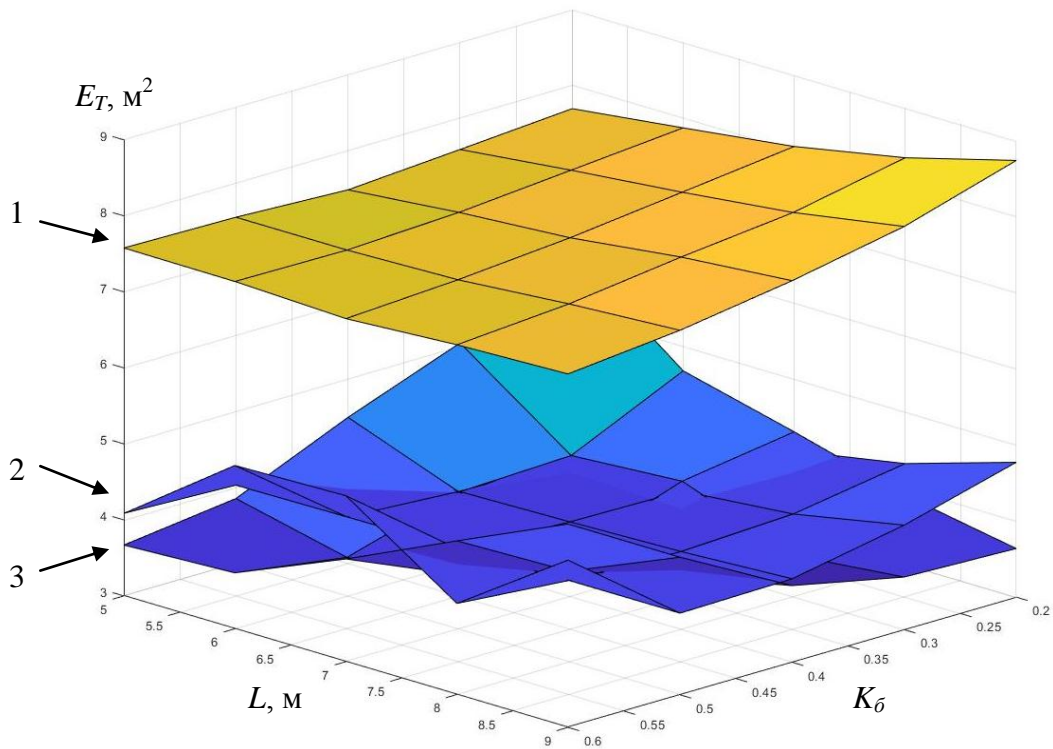


Рисунок 5.5.4 – Зависимости интегрального критерия различных методов управления от длины базы L_b и коэффициента базы K_b ($V = 2 \text{ м/с}$)
 1 – метод Стэнли; 2 – метод «чистое преследование»; 3 – копирный метод.

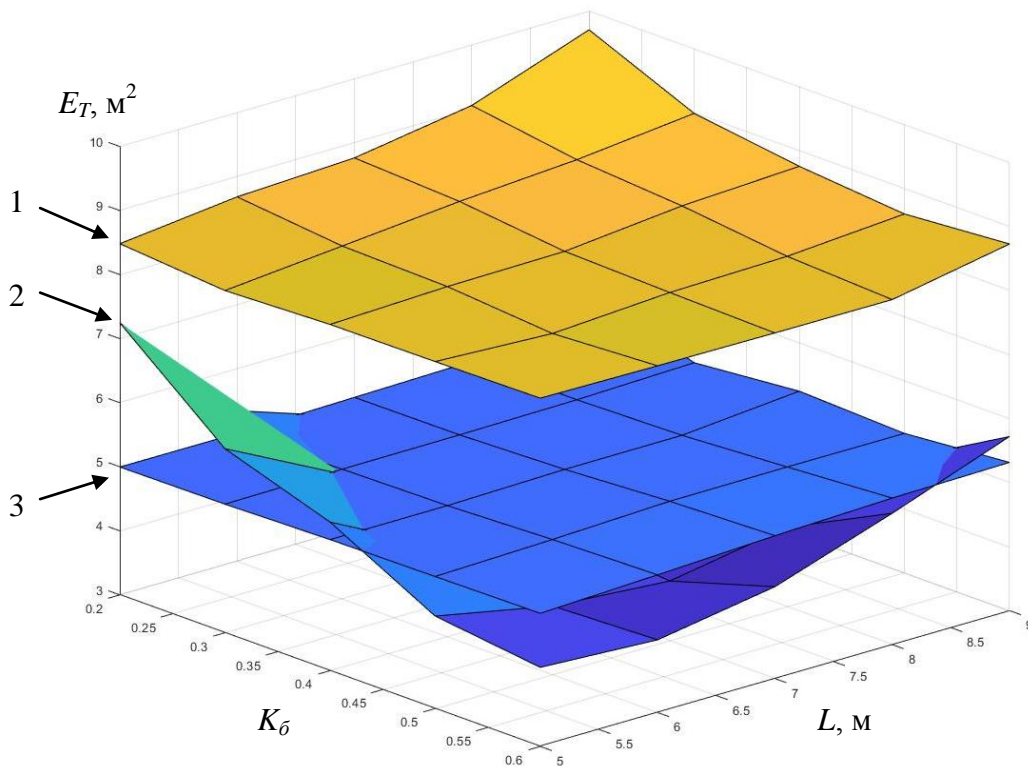


Рисунок 5.5.5 – Зависимости интегрального критерия различных методов управления от длины базы L_b и коэффициента базы K_b ($V = 2,5$ м/с)
 1 – метод Стэнли; 2 – метод «чистое преследование»; 3 – копирный метод.

Сравнение производилось для различных значений длины базы, коэффициента базы и скорости машины. Результаты сравнения представлены на рисунках 5.5.1 – 5.5.5 [192].

Из представленных зависимостей можно сделать вывод об эффективности предложенного копирного метода управления на всех скоростях движения ДСМ. Значения критерия эффективности предложенного копирного метода оказались лучше значений других методов управления до 50% [192].

5.6. Теоретические исследования копирного метода управления при расположении рабочего органа перед базой машины

Результаты теоретических исследований, которые приведены в п. 5.4, были получены для автогрейдера с РО, расположенным в базе машины. Однако многие модели ДСМ снабжаются РО, расположенными перед базой машины. Для

корректного применения предложенного копирного метода при управлении ДСМ с передним расположением РО были проведены исследования на математической модели фронтального погрузчика. Коэффициент базы машины при этих исследованиях варьировался в пределах от $-0,1$ до $-0,5$, отрицательные значения которого означают расположением РО перед базой машины (рисунок 5.6.1).

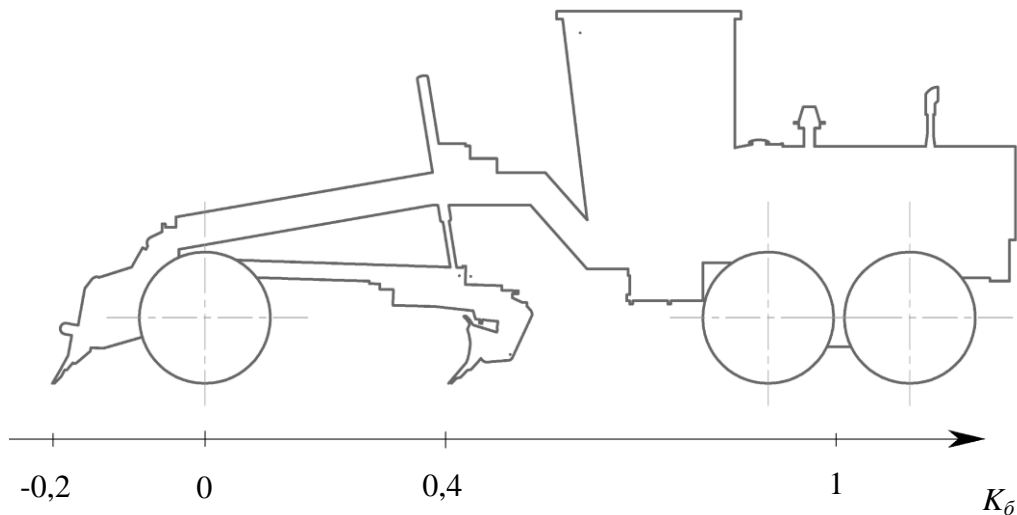


Рисунок 5.6.1 – Влияние расположения рабочего органа на значение коэффициента базы

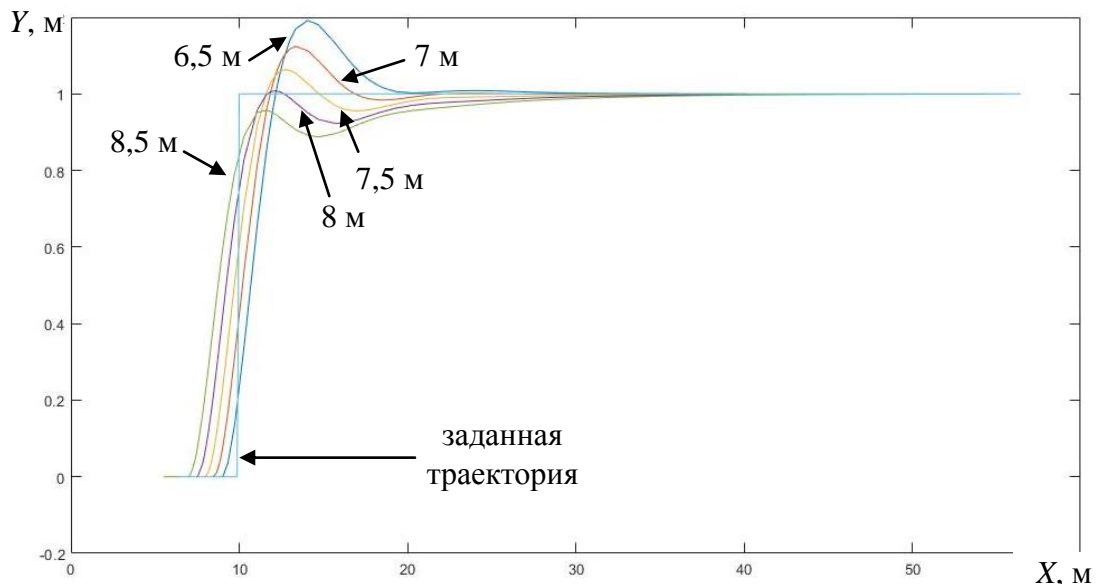


Рисунок 5.6.2 – Траектории движения центральной точки рабочего органа при различных значениях выноса точки копирования L_0 ($L = 5$ м, $K_{\delta} = -0,1$, $V = 0,5$ м/с)

При исследованиях на вход математической модели подавалось ступенчатое воздействие – изменение заданной траектории движения на 1 метр (см. рис. 5.6.2).

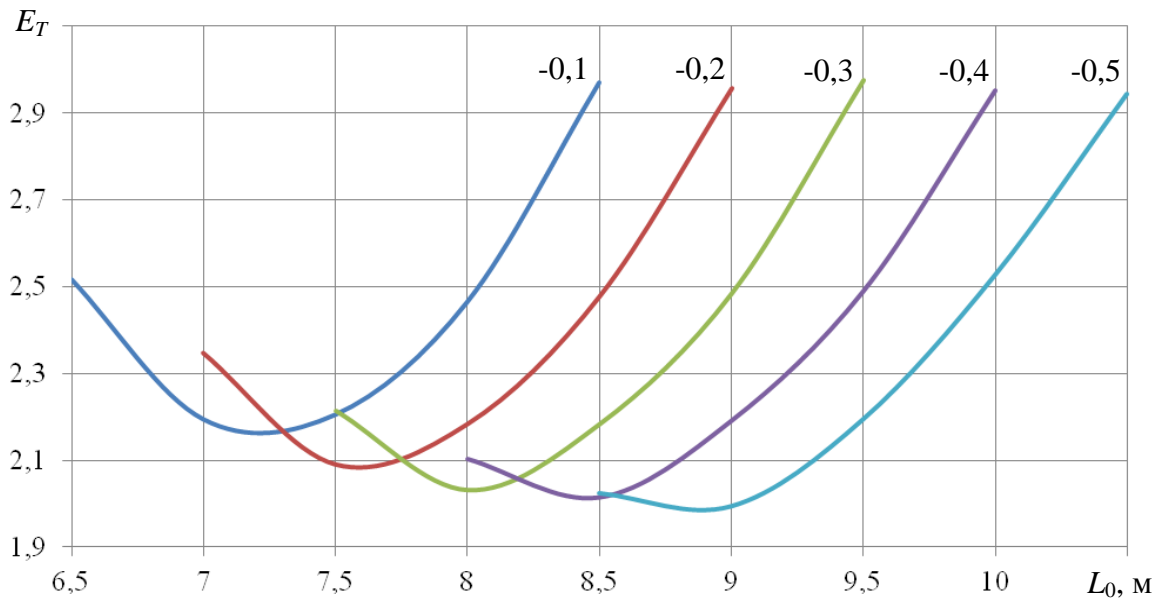


Рисунок 5.6.3 – Влияние выноса точки копирования L_0 на интегральный критерий E_T при разных значениях коэффициента базы K_b ($L = 5$ м, $V = 0,5$ м/с)

Варьируемые параметры при исследовании копирного метода управления были разделены на три подгруппы:

- 1) Конструктивные параметры ДСМ (длина базы, коэффициент базы).
- 2) Эксплуатационные параметры ДСМ (скорость машины).
- 3) Параметры метода управления (вынос точки копирования).

При проведении исследований было выявлено, что оптимальное значение коэффициента усиления не зависит от длины базы и коэффициента базы и равно 0,5 (рисунок 5.6.3). В связи с этим, диапазон факторов был принят следующим образом:

- 1) Длина базы ДСМ $L = 5 \dots 9$ м;
- 2) Коэффициент базы $K_b = -0,1 \dots -0,5$
- 3) Скорость ДСМ $V = 0,5 \dots 2$ м/с;
- 4) Вынос точки копирования $L_0 = 6,5 \dots 22,5$ м.

В качестве критериев эффективности были выбраны интегральный критерий E_T и перерегулирование переходного процесса СУ. Полученные результаты были оформлены графически в виде комплекса поверхностей для различных длин базы и разных значений скорости ДСМ (рисунки 5.6.4 – 5.6.11).

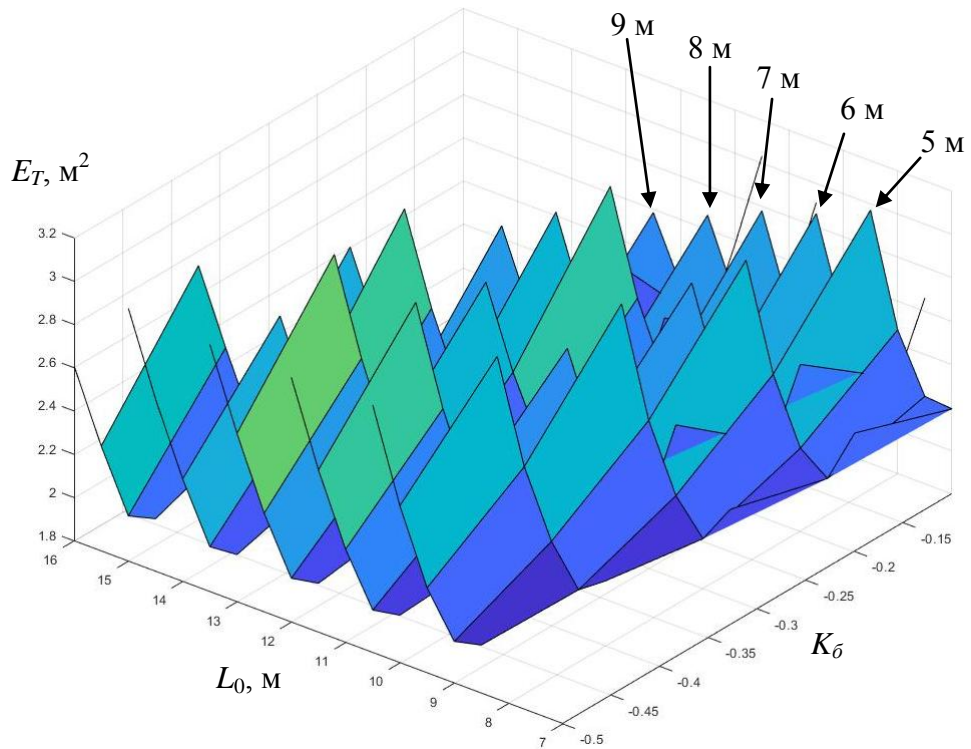


Рисунок 5.6.4 – Зависимости интегрального критерия E_T от выноса точки копирования L_0 и коэффициента базы K_β при различных значениях длины базы L ($V = 0,5$ м/с)

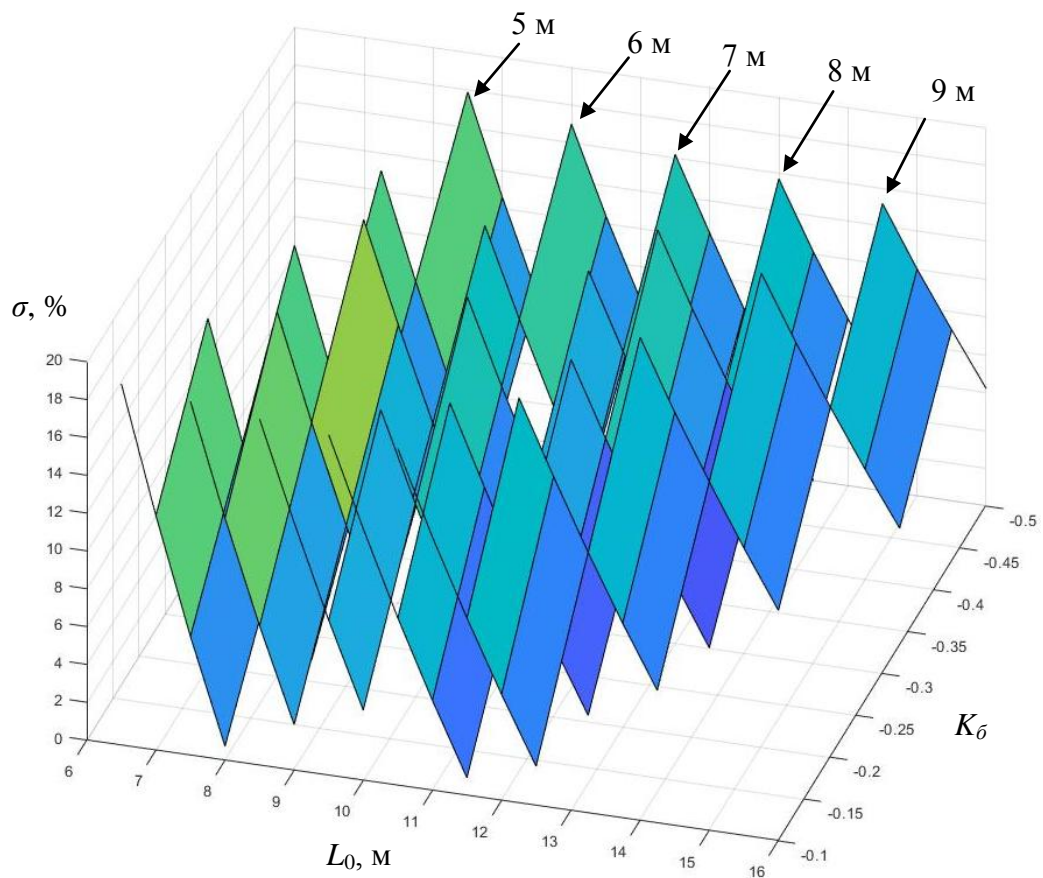


Рисунок 5.6.5 – Зависимости перегулирования σ от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_β ($L = 5$ м, $V = 0,5$ м/с)

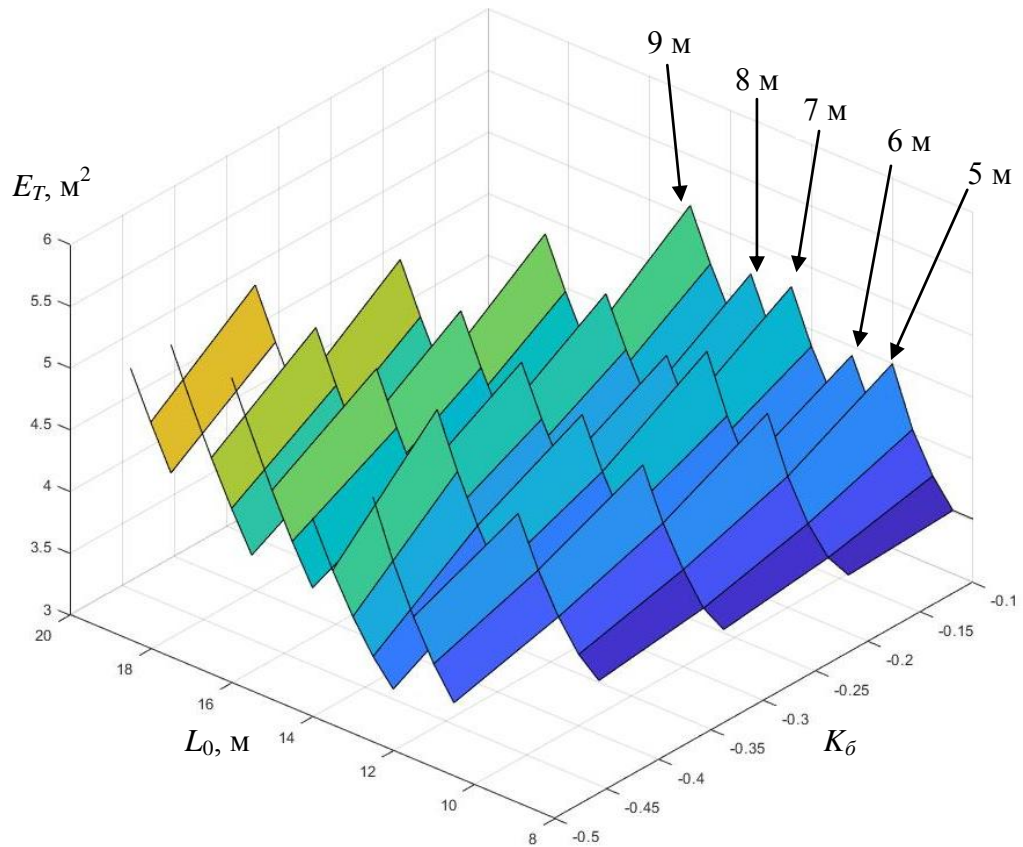


Рисунок 5.6.6 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_δ ($L = 6$ м, $V = 0,5$ м/с)

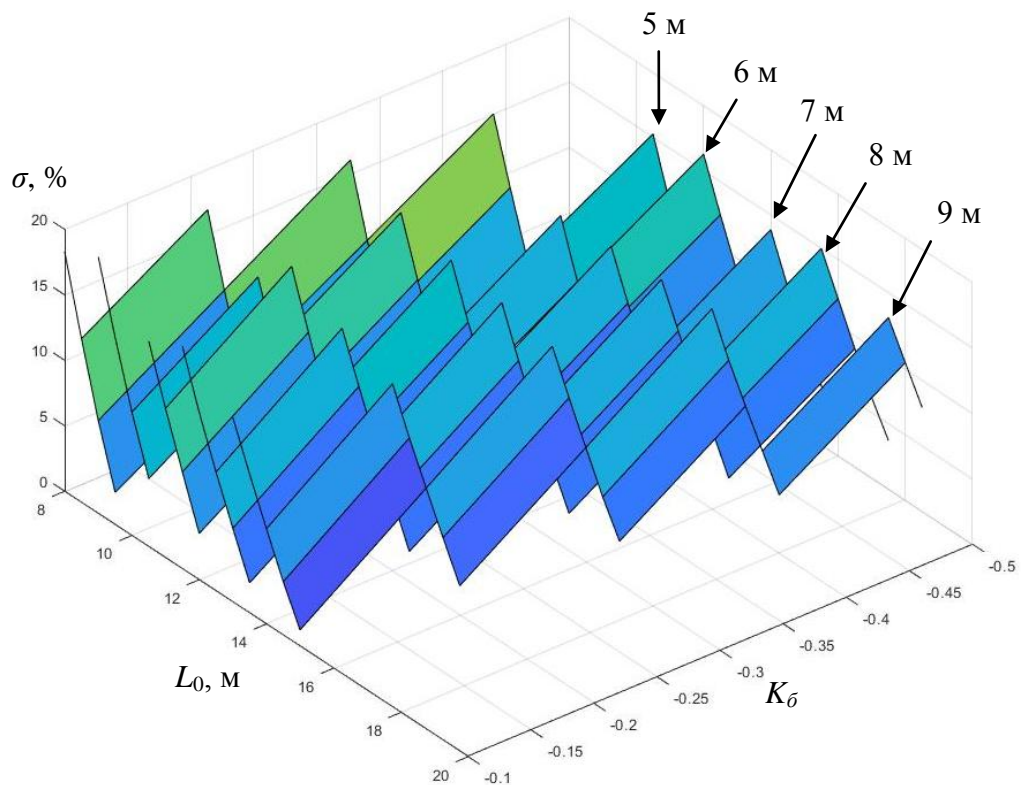


Рисунок 5.6.7 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_y и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_δ ($L = 6$ м, $V = 0,5$ м/с)

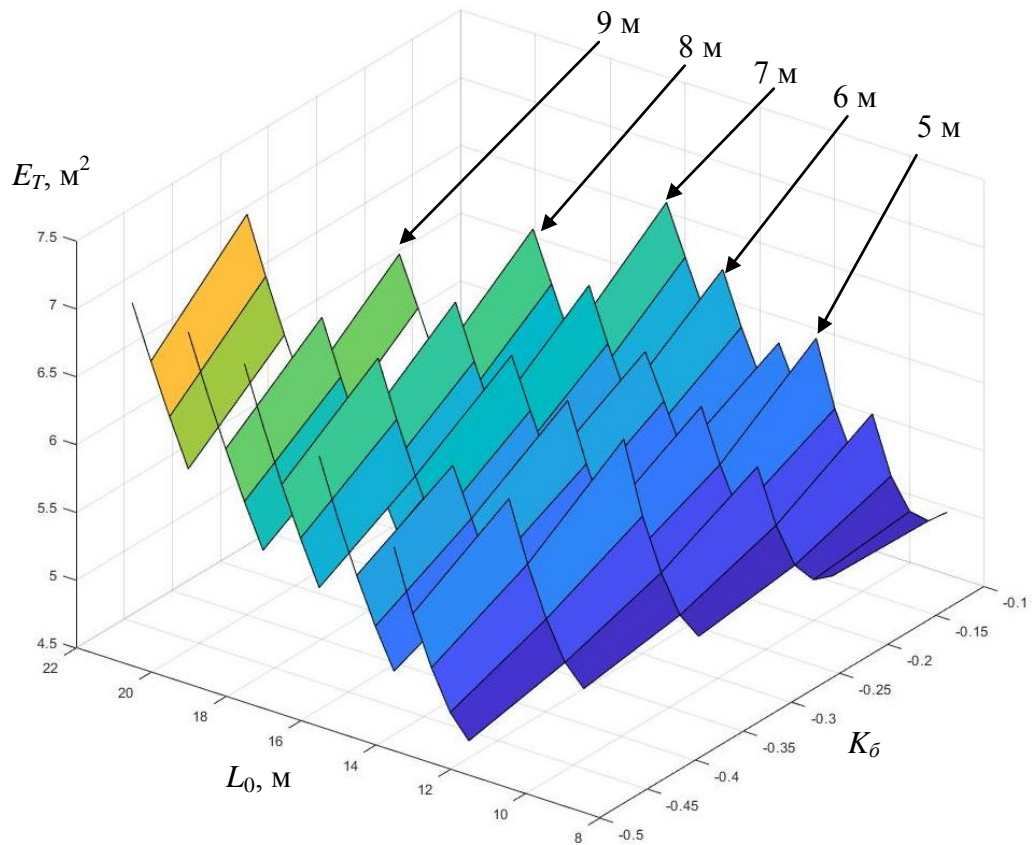


Рисунок 5.6.8 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_U и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 7$ м, $V = 0,5$ м/с)

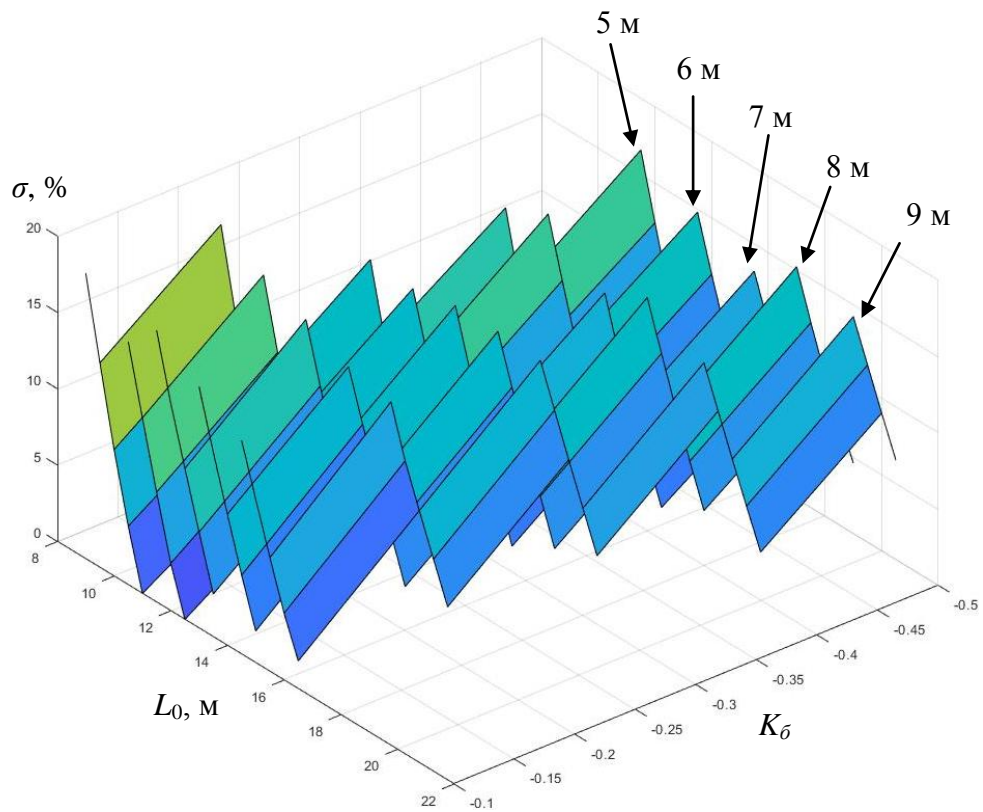


Рисунок 5.6.9 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_U и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 7$ м, $V = 0,5$ м/с)

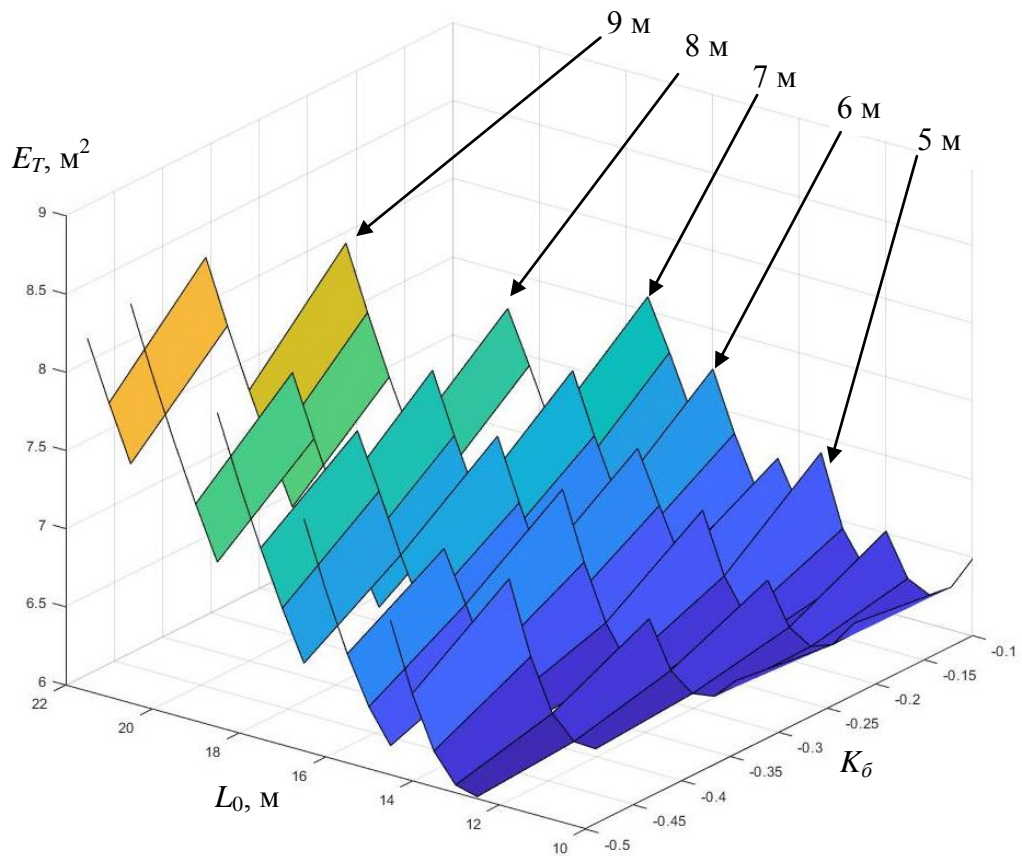


Рисунок 5.6.10 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k_γ и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_δ ($L = 8$ м, $V = 0,5$ м/с)

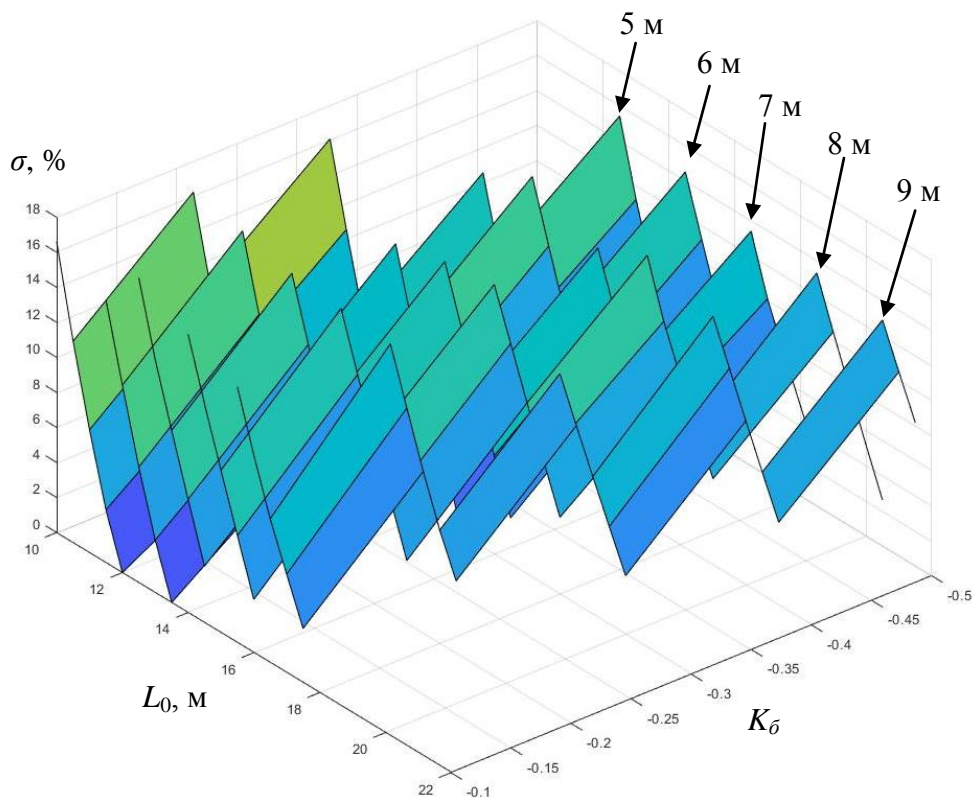


Рисунок 5.6.11 – Зависимости перерегулирования σ от коэффициента усиления k_γ и выноса точки копирования L_0 при различных значениях коэффициента базы K_δ ($L = 8$ м, $V = 0,5$ м/с)

Полученные зависимости были аппроксимированы методом наименьших квадратов. Уравнения регрессии представлены в таблицах 5.32 – 5.35.

Таблица 5.32

Уравнения регрессии для скорости $V = 0,5$ м/с

L	K_{δ}	Уравнение регрессии	R^2	Уравнение регрессии	R^2
5	-0,1	$E_T = 31,105 - 7,945 \cdot L_0 + 0,5454 \cdot L_0^2$	0,998	$\sigma = 98,374 - 12,24 \cdot L_0$	0,998
	-0,2	$E_T = 30,24 - 7,3388 \cdot L_0 + 0,4788 \cdot L_0^2$	0,993	$\sigma = 98,674 - 11,51 \cdot L_0$	0,998
	-0,3	$E_T = 29,721 - 6,8796 \cdot L_0 + 0,4279 \cdot L_0^2$	0,995	$\sigma = 99,552 - 10,89 \cdot L_0$	0,998
	-0,4	$E_T = 26,586 - 5,859 \cdot L_0 + 0,3497 \cdot L_0^2$	0,997	$\sigma = 100,2 - 10,31 \cdot L_0$	0,998
	-0,5	$E_T = 24,168 - 5,1017 \cdot L_0 + 0,2935 \cdot L_0^2$	0,972	$\sigma = 100,7 - 9,766 \cdot L_0$	0,998
6	-0,1	$E_T = 42,568 - 9,6168 \cdot L_0 + 0,5725 \cdot L_0^2$	0,993	$\sigma = 99,915 - 10,86 \cdot L_0$	0,998
	-0,2	$E_T = 42,637 - 9,111 \cdot L_0 + 0,5125 \cdot L_0^2$	0,981	$\sigma = 101,92 - 10,354 \cdot L_0$	0,998
	-0,3	$E_T = 47,366 - 9,648 \cdot L_0 + 0,5138 \cdot L_0^2$	0,966	$\sigma = 103,73 - 9,872 \cdot L_0$	0,998
	-0,4	$E_T = 27,618 - 5,345 \cdot L_0 + 0,2792 \cdot L_0^2$	0,998	$\sigma = 98,86 - 8,76 \cdot L_0$	0,999
	-0,5	$E_T = 27,864 - 5,138 \cdot L_0 + 0,2551 \cdot L_0^2$	0,993	$\sigma = 98,264 - 8,159 \cdot L_0$	0,998
7	-0,1	$E_T = 53,49 - 10,79 \cdot L_0 + 0,5684 \cdot L_0^2$	0,998	$\sigma = 100,87 - 9,734 \cdot L_0$	0,998
	-0,2	$E_T = 45,84 - 8,702 \cdot L_0 + 0,4334 \cdot L_0^2$	0,987	$\sigma = 97,47 - 8,71 \cdot L_0$	0,998
	-0,3	$E_T = 52,642 - 9,459 \cdot L_0 + 0,4427 \cdot L_0^2$	0,947	$\sigma = 100,49 - 8,39 \cdot L_0$	0,998
	-0,4	$E_T = 26,593 - 4,619 \cdot L_0 + 0,2166 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 97,784 - 7,608 \cdot L_0$	0,999
	-0,5	$E_T = 33,95 - 5,555 \cdot L_0 + 0,2415 \cdot L_0^2$	0,991	$\sigma = 101,28 - 7,408 \cdot L_0$	0,999
8	-0,1	$E_T = 67,464 - 12,31 \cdot L_0 + 0,5801 \cdot L_0^2$	0,981	$\sigma = 98,784 - 8,535 \cdot L_0$	0,998
	-0,2	$E_T = 68,704 - 11,76 \cdot L_0 + 0,5196 \cdot L_0^2$	0,951	$\sigma = 96,87 - 7,744 \cdot L_0$	0,998
	-0,3	$E_T = 49,368 - 7,983 \cdot L_0 + 0,3373 \cdot L_0^2$	0,985	$\sigma = 95,456 - 7,086 \cdot L_0$	0,998
	-0,4	$E_T = 70,677 - 10,82 \cdot L_0 + 0,2166 \cdot L_0^2$	0,914	$\sigma = 100,43 - 6,982 \cdot L_0$	0,998
	-0,5	$E_T = 41,283 - 6,073 \cdot L_0 + 0,2347 \cdot L_0^2$	0,991	$\sigma = 99,348 - 6,452 \cdot L_0$	0,998
9	-0,1	$E_T = 82,237 - 13,68 \cdot L_0 + 0,5845 \cdot L_0^2$	0,969	$\sigma = 99,883 - 7,846 \cdot L_0$	0,998
	-0,2	$E_T = 89,152 - 13,92 \cdot L_0 + 0,5567 \cdot L_0^2$	0,979	$\sigma = 99,261 - 7,206 \cdot L_0$	0,998
	-0,3	$E_T = 89,287 - 13,09 \cdot L_0 + 0,492 \cdot L_0^2$	0,929	$\sigma = 99,099 - 6,674 \cdot L_0$	0,998
	-0,4	$E_T = 74,256 - 10,29 \cdot L_0 + 0,367 \cdot L_0^2$	0,941	$\sigma = 98,858 - 6,196 \cdot L_0$	0,998
	-0,5	$E_T = 48,688 - 6,47 \cdot L_0 + 0,2242 \cdot L_0^2$	0,985	$\sigma = 99,621 - 5,834 \cdot L_0$	0,999

Таблица 5.33

Уравнения регрессии для скорости $V = 1$ м/с

L	K_{δ}	Уравнение регрессии	R^2	Уравнение регрессии	R^2
5	-0,1	$E_T = 22,808 - 4,7398 \cdot L_0 + 0,2909 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 102,77 - 10,592 \cdot L_0$	0,997
	-0,2	$E_T = 20,618 - 4,0703 \cdot L_0 + 0,2415 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 102,9 - 9,97 \cdot L_0$	0,999
	-0,3	$E_T = 17,228 - 3,2231 \cdot L_0 + 0,1878 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 105,44 - 9,644 \cdot L_0$	0,998
	-0,4	$E_T = 15,985 - 2,8587 \cdot L_0 + 0,1618 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 106,04 - 9,152 \cdot L_0$	0,999
	-0,5	$E_T = 14,449 - 2,4845 \cdot L_0 + 0,1382 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 103,77 - 8,44 \cdot L_0$	0,999
6	-0,1	$E_T = 22,747 - 4,2249 \cdot L_0 + 0,2327 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 105,98 - 9,626 \cdot L_0$	0,997
	-0,2	$E_T = 19,242 - 3,3819 \cdot L_0 + 0,1815 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 100,17 - 8,456 \cdot L_0$	0,999
	-0,3	$E_T = 15,909 - 2,6526 \cdot L_0 + 0,1405 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 105,27 - 8,347 \cdot L_0$	0,999
	-0,4	$E_T = 14,347 - 2,295 \cdot L_0 + 0,1191 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 101,35 - 7,544 \cdot L_0$	0,997
	-0,5	$E_T = 14,589 - 2,1932 \cdot L_0 + 0,1057 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 101,38 - 7,102 \cdot L_0$	0,999

7	-0,1	$E_T = 19,529 - 3,2664 \cdot L_0 + 0,1669 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 97,925 - 7,854 \cdot L_0$	0,998
	-0,2	$E_T = 17,219 - 2,7367 \cdot L_0 + 0,136 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 103,19 - 7,75 \cdot L_0$	0,997
	-0,3	$E_T = 15,029 - 2,2856 \cdot L_0 + 0,1117 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 100,54 - 7,038 \cdot L_0$	0,998
	-0,4	$E_T = 13,1 - 1,9223 \cdot L_0 + 0,0931 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 101,19 - 6,642 \cdot L_0$	0,998
	-0,5	$E_T = 7,0492 - 1,0292 \cdot L_0 + 0,0582 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 98,138 - 6,036 \cdot L_0$	0,998
8	-0,1	$E_T = 21,895 - 3,4042 \cdot L_0 + 0,158 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 100,86 - 7,32 \cdot L_0$	0,997
	-0,2	$E_T = 16,535 - 2,4277 \cdot L_0 + 0,1122 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 101,43 - 6,844 \cdot L_0$	0,999
	-0,3	$E_T = 14,253 - 2,0126 \cdot L_0 + 0,0919 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 101,01 - 6,348 \cdot L_0$	0,997
	-0,4	$E_T = 12,128 - 1,6622 \cdot L_0 + 0,0758 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 100,37 - 5,894 \cdot L_0$	0,999
	-0,5	$E_T = 10,202 - 1,3754 \cdot L_0 + 0,0633 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 103,09 - 5,692 \cdot L_0$	0,998
9	-0,1	$E_T = 18,354 - 2,6341 \cdot L_0 + 0,1167 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 97,81 - 6,454 \cdot L_0$	0,998
	-0,2	$E_T = 15,606 - 2,1442 \cdot L_0 + 0,0934 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 98,246 - 6,008 \cdot L_0$	0,999
	-0,3	$E_T = 13,286 - 1,7661 \cdot L_0 + 0,0764 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 101,47 - 5,788 \cdot L_0$	0,998
	-0,4	$E_T = 11,201 - 1,4581 \cdot L_0 + 0,0633 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 101,25 - 5,386 \cdot L_0$	0,998
	-0,5	$E_T = 8,4378 - 1,1114 \cdot L_0 + 0,0506 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 101,85 - 5,074 \cdot L_0$	0,999

Таблица 5.34

Уравнения регрессии для скорости $V = 1,5$ м/с

L	K_6	Уравнение регрессии	R^2	Уравнение регрессии	R^2
5	-0,1	$E_T = 37,52 - 6,7946 \cdot L_0 + 0,3531 \cdot L_0^2$	0,998	$\sigma = 107,95 - 9,938 \cdot L_0$	0,998
	-0,2	$E_T = 36,384 - 6,3158 \cdot L_0 + 0,3157 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 109,93 - 9,574 \cdot L_0$	0,998
	-0,3	$E_T = 32,732 - 5,4374 \cdot L_0 + 0,2641 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 103,83 - 8,498 \cdot L_0$	0,997
	-0,4	$E_T = 24,966 - 3,9134 \cdot L_0 + 0,1887 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 103,11 - 7,99 \cdot L_0$	0,996
	-0,5	$E_T = 25,621 - 3,8948 \cdot L_0 + 0,1809 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 106,89 - 7,87 \cdot L_0$	0,998
6	-0,1	$E_T = 36,319 - 5,9561 \cdot L_0 + 0,282 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 105,44 - 8,534 \cdot L_0$	0,999
	-0,2	$E_T = 29,461 - 4,5484 \cdot L_0 + 0,2099 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 103,94 - 7,884 \cdot L_0$	0,996
	-0,3	$E_T = 20,227 - 2,9275 \cdot L_0 + 0,1375 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 98,564 - 7,008 \cdot L_0$	0,999
	-0,4	$E_T = 15,962 - 2,1632 \cdot L_0 + 0,1023 \cdot L_0^2$	0,998	$\sigma = 106,42 - 7,18 \cdot L_0$	0,999
	-0,5	$E_T = 13,872 - 1,8301 \cdot L_0 + 0,0874 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 104,25 - 6,634 \cdot L_0$	0,999
7	-0,1	$E_T = 26,12 - 3,7971 \cdot L_0 + 0,1699 \cdot L_0^2$	0,998	$\sigma = 103,35 - 7,462 \cdot L_0$	0,998
	-0,2	$E_T = 15,986 - 2,1251 \cdot L_0 + 0,0995 \cdot L_0^2$	0,998	$\sigma = 106,04 - 7,182 \cdot L_0$	0,999
	-0,3	$E_T = 11,211 - 1,4102 \cdot L_0 + 0,0709 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 106,29 - 6,758 \cdot L_0$	0,999
	-0,4	$E_T = 13,567 - 1,6883 \cdot L_0 + 0,0771 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 98,187 - 5,834 \cdot L_0$	0,997
	-0,5	$E_T = 11,302 - 1,3549 \cdot L_0 + 0,0634 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 98,738 - 5,524 \cdot L_0$	0,999
8	-0,1	$E_T = 19,367 - 2,5729 \cdot L_0 + 0,1131 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 104,99 - 6,874 \cdot L_0$	0,999
	-0,2	$E_T = 16,987 - 2,1394 \cdot L_0 + 0,0925 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 99,71 - 6,058 \cdot L_0$	0,999
	-0,3	$E_T = 15,169 - 1,8274 \cdot L_0 + 0,078 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 104,94 - 5,988 \cdot L_0$	0,999
	-0,4	$E_T = 13,322 - 1,5424 \cdot L_0 + 0,0658 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 108,94 - 5,86 \cdot L_0$	0,999
	-0,5	$E_T = 11,633 - 1,3048 \cdot L_0 + 0,0561 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 104,58 - 5,276 \cdot L_0$	0,995
9	-0,1	$E_T = 13,234 - 1,5896 \cdot L_0 + 0,0719 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 102,78 - 6,136 \cdot L_0$	0,997
	-0,2	$E_T = 11,151 - 1,283 \cdot L_0 + 0,0588 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 99,736 - 5,524 \cdot L_0$	0,997
	-0,3	$E_T = 8,4447 - 0,9283 \cdot L_0 + 0,0456 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 101,87 - 5,268 \cdot L_0$	0,999
	-0,4	$E_T = 11,961 - 1,3067 \cdot L_0 + 0,0541 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 104,58 - 5,074 \cdot L_0$	0,999
	-0,5	$E_T = 10,232 - 1,0942 \cdot L_0 + 0,0461 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 109,11 - 4,999 \cdot L_0$	0,999

Уравнения регрессии для скорости $V = 2$ м/с

L	K_{δ}	Уравнение регрессии	R^2	Уравнение регрессии	R^2
5	-0,1	$E_T = 44,951 - 7,0545 \cdot L_0 + 0,3209 \cdot L_0^2$	0,995	$\sigma = 106,84 - 9,502 \cdot L_0$	0,997
	-0,2	$E_T = 43,708 - 6,5918 \cdot L_0 + 0,289 \cdot L_0^2$	0,996	$\sigma = 110,34 - 8,878 \cdot L_0$	0,999
	-0,3	$E_T = 45,562 - 6,6931 \cdot L_0 + 0,2837 \cdot L_0^2$	0,995	$\sigma = 112,47 - 8,602 \cdot L_0$	0,998
	-0,4	$E_T = 52,406 - 7,574 \cdot L_0 + 0,3093 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 106,78 - 7,714 \cdot L_0$	0,997
	-0,5	$E_T = 48,236 - 6,7125 \cdot L_0 + 0,2668 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 107,74 - 7,406 \cdot L_0$	0,997
6	-0,1	$E_T = 55,586 - 8,2041 \cdot L_0 + 0,3405 \cdot L_0^2$	0,996	$\sigma = 107,07 - 8,02 \cdot L_0$	0,998
	-0,2	$E_T = 51,744 - 7,309 \cdot L_0 + 0,2928 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 110,75 - 7,85 \cdot L_0$	0,998
	-0,3	$E_T = 43,637 - 5,8696 \cdot L_0 + 0,2293 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 104,8 - 6,98 \cdot L_0$	0,996
	-0,4	$E_T = 32,641 - 4,1084 \cdot L_0 + 0,1587 \cdot L_0^2$	0,996	$\sigma = 103,77 - 6,516 \cdot L_0$	0,999
	-0,5	$E_T = 29,595 - 3,6077 \cdot L_0 + 0,1375 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 105,72 - 6,298 \cdot L_0$	0,999
7	-0,1	$E_T = 44,757 - 5,9547 \cdot L_0 + 0,2301 \cdot L_0^2$	0,998	$\sigma = 105,06 - 7,038 \cdot L_0$	0,997
	-0,2	$E_T = 38,165 - 4,8347 \cdot L_0 + 0,1826 \cdot L_0^2$	0,997	$\sigma = 104,84 - 6,59 \cdot L_0$	0,999
	-0,3	$E_T = 31,802 - 3,843 \cdot L_0 + 0,1433 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 104,54 - 6,18 \cdot L_0$	0,999
	-0,4	$E_T = 17,275 - 1,9021 \cdot L_0 + 0,0773 \cdot L_0^2$	0,995	$\sigma = 101,61 - 5,652 \cdot L_0$	0,999
	-0,5	$E_T = 14,053 - 1,5054 \cdot L_0 + 0,0637 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 99,605 - 5,246 \cdot L_0$	0,995
8	-0,1	$E_T = 40,571 - 5,0349 \cdot L_0 + 0,2301 \cdot L_0^2$	0,998	$\sigma = 105,75 - 6,426 \cdot L_0$	0,999
	-0,2	$E_T = 33,889 - 3,968 \cdot L_0 + 0,142 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 106,26 - 6,044 \cdot L_0$	0,999
	-0,3	$E_T = 22,04 - 2,4123 \cdot L_0 + 0,0898 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 103,58 - 5,514 \cdot L_0$	0,999
	-0,4	$E_T = 16,15 - 1,6714 \cdot L_0 + 0,0652 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 103,13 - 5,18 \cdot L_0$	0,995
	-0,5	$E_T = 13,243 - 1,3124 \cdot L_0 + 0,0529 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 112,01 - 5,34 \cdot L_0$	0,999
9	-0,1	$E_T = 20,837 - 2,2677 \cdot L_0 + 0,0864 \cdot L_0^2$	0,998	$\sigma = 103,27 - 5,74 \cdot L_0$	0,996
	-0,2	$E_T = 17,434 - 1,7968 \cdot L_0 + 0,0689 \cdot L_0^2$	0,998	$\sigma = 108,74 - 5,67 \cdot L_0$	0,996
	-0,3	$E_T = 15,704 - 1,5746 \cdot L_0 + 0,0604 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 95,848 - 4,628 \cdot L_0$	0,999
	-0,4	$E_T = 13,988 - 1,3472 \cdot L_0 + 0,0517 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 104,38 - 4,748 \cdot L_0$	0,999
	-0,5	$E_T = 11,961 - 1,1141 \cdot L_0 + 0,0438 \cdot L_0^2$	0,999	$\sigma = 108,01 - 4,642 \cdot L_0$	0,999

В результате проведенной оптимизации были получены оптимальные значения выноса точки копирования для различных значений длины базы, коэффициента базы и скорости (таблицы 5.36-5.39).

Таблица 5.36

Оптимальные значения выноса точки копирования L_0 ($V = 0,5$ м/с)

$L \backslash K_{\delta}$	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5
5	7,28	7,71	8,22	8,75	9,29
6	8,4	8,89	9,5	10,15	10,82
7	9,5	10,05	10,79	11,54	12,33
8	10,61	11,32	12,06	12,96	13,85
9	11,7	12,5	13,36	14,35	15,37

Таблица 5.37

Оптимальные значения выноса точки копирования L_0 ($V = 1$ м/с)

$L \backslash K_6$	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5
5	8,76	9,32	9,9	10,5	11,12
6	9,98	10,67	11,42	12,11	12,87
7	11,2	12,03	12,87	13,73	14,61
8	12,42	13,36	14,34	15,34	16,36
9	13,61	14,69	15,81	16,95	18,11

Таблица 5.38

Оптимальные значения выноса точки копирования L_0 ($V = 1,5$ м/с)

$L \backslash K_6$	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5
5	9,86	10,44	11,05	11,66	12,32
6	11,19	11,92	12,64	13,43	14,21
7	12,52	13,38	14,25	15,12	16,07
8	13,82	14,81	15,86	16,89	17,93
9	15,13	16,25	17,44	18,65	19,83

Таблица 5.39

Оптимальные значения выноса точки копирования L_0 ($V = 2$ м/с)

$L \backslash K_6$	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5
5	10,99	11,4	11,92	12,55	13,2
6	12,11	12,84	13,59	14,4	15,2
7	13,51	14,4	15,3	16,21	17,09
8	14,91	15,93	16,98	17,98	19,11
9	16,25	17,42	18,55	19,88	21,12

Графики полученных оптимальных значений выноса точки копирования представлены на рисунке 5.6.12.

Полученные зависимости оптимальных значений выноса точки копирования от длины базы и коэффициента базы были аппроксимированы следующими уравнениями, представленными в таблице 5.40.

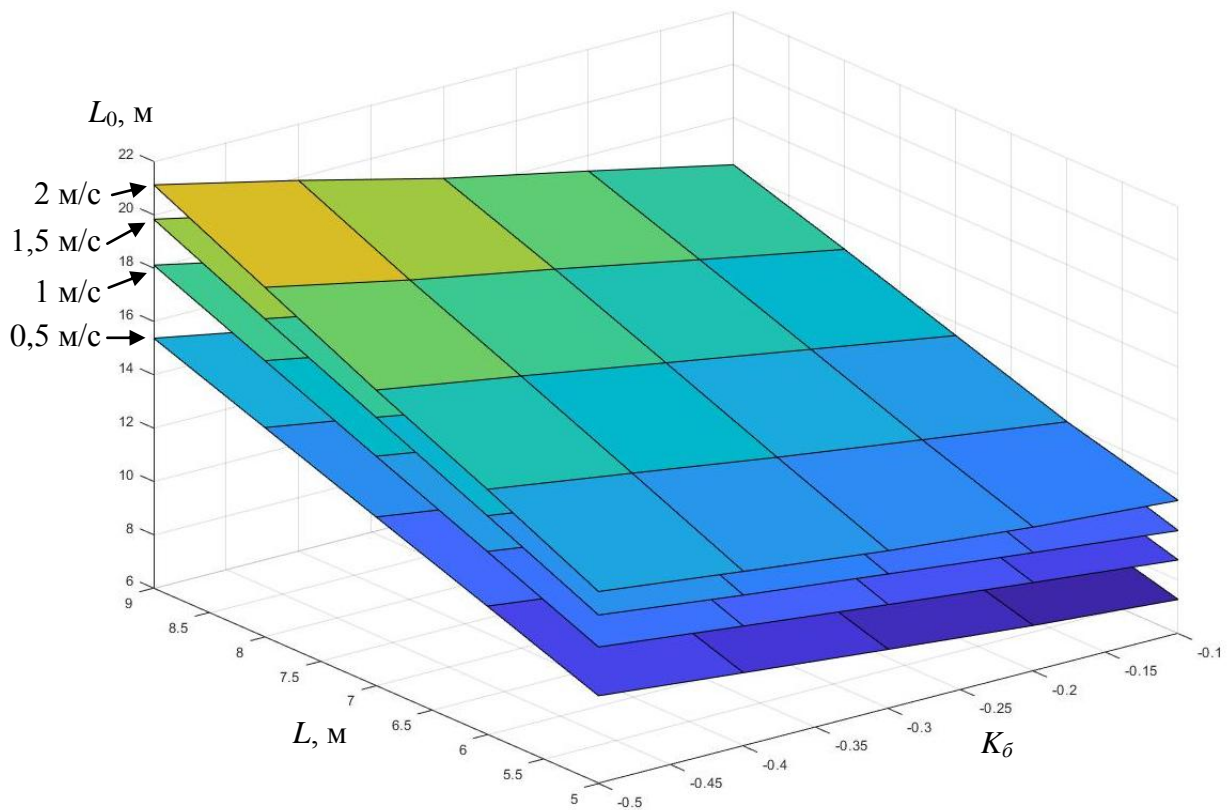


Рисунок 5.6.12 – Зависимости оптимального значения выноса точки копирования L_0 при различных значениях скорости V , длины базы L и коэффициента базы K_{δ}

Таблица 5.40

Уравнения регрессии оптимального значения выноса точки копирования

$V, \text{ м/с}$	Уравнение	R^2
0,5	$L_0 = 1,5 \cdot L - 8 \cdot K_{\delta} - 2,048$	0,969
1	$L_0 = 1,5 \cdot L - 8 \cdot K_{\delta} - 0,0168$	0,987
1,5	$L_0 = 1,5 \cdot L - 8 \cdot K_{\delta} + 1,367$	0,983
2	$L_0 = 1,5 \cdot L - 8 \cdot K_{\delta} + 2,414$	0,976

Полученные зависимости выноса точки копирования можно представить в следующем виде:

$$L_0 = 1,5 \cdot L - 8 \cdot K_\sigma + a_0. \quad (5.6.1)$$

Коэффициент a_0 зависит от скорости движения ДСМ, и эта зависимость была аппроксимирована с высокой точностью ($R^2 = 0,978$) уравнением:

$$a_0 = 2,95 \cdot V - 3,26. \quad (5.6.2)$$

В результате подстановки была получена итоговая функциональная зависимость выноса точки копирования от длины базы, коэффициента базы и скорости ДСМ

$$L_0 = 2,95 \cdot V + (1,5 \cdot L - 8,2 \cdot K_\sigma - 3,26). \quad (5.6.3)$$

или в обобщенном виде

$$L_0 = a \cdot V + b, \quad (5.6.4)$$

где $a = 2,95$, $b = 1,5 \cdot L - 8,2 \cdot K_\sigma - 3,26$.

Таким образом, в результате проведенных исследований копирный метод управления может быть использован для управления ДСМ при расположении РО перед базой машины, например для фронтального погрузчика. Оптимальные значения настройки параметров метода представлены функциональной зависимостью (5.6.4).

5.7. Выводы по пятой главе

1. Проведенные исследования математических моделей процесса поворота ДСМ с различными типами рулевого управления позволили установить функциональную зависимость угла поворота передних колес от угла складывания полурам и коэффициента базы ДСМ для случая движения передней и задней осей по одной траектории.

2. Проведенные теоретические исследования метода «чистое преследование» (Pure Pursuit) позволили получить функциональную зависимость оптимального значения параметра «дальность видимости» от длины базы и коэффициента базы дорожно-строительной машины ($L_0 = (1,6 + 0,04 \cdot L) \cdot V + (3,2 - 5 \cdot K_\sigma + 0,5 \cdot L)$). Таким образом, метод «чистое преследование» был модернизирован путем введения

дополнительного информационного параметра – скорости, что позволило повысить точность работы во всем диапазоне рабочих скоростей машины.

3. Проведенные теоретические исследования метода «Стэнли» (Stanley) позволили получить функциональную зависимость оптимального значения коэффициента усиления от длины базы и коэффициента базы дорожно-строительной машины ($k = -349,9 + 582,3 \cdot K_{\sigma} + 58,98 \cdot L$). Таким образом, метод «Стэнли» был адаптирован для управления колесной дорожно-строительной машиной.

4. Разработан новый копирный метод управления, для которого на основании проведенных теоретических исследований были получены функциональные зависимости оптимальных значений параметров метода управления ($k_y = V^5(1,7856 + 1,085 \cdot K_{\sigma} - 0,1308 \cdot L) + (1,247 - 0,7772 \cdot K_{\sigma} + 0,1154 \cdot L)$, $L_0 = 1,77 \cdot V + (3,55 - 8,2 \cdot K_{\sigma} + 0,71 \cdot L)$) от основных параметров дорожно-строительной машины (длина базы, коэффициент базы, скорость). Значения критерия эффективности копирного метода оказались в диапазоне $E_T = 1,717 \dots 5,314$ при значениях скорости машины $V = 0,5 \dots 2,5$ м/с, что лучше значений метода «чистое преследование» ($E_T = 1,781 \dots 7,247$) в среднем на 23%, и лучше значений метода «Стэнли» ($E_T = 3,851 \dots 9,82$) в среднем на 54%.

5. Проведенные теоретические исследования предложенного копирного метода управления при расположении РО перед базой машины позволили выявить зависимости между основными параметрами машины и метода управления (длина базы ДСМ, коэффициент базы ДСМ, скорость ДСМ, вынос точки копирования) и критериями эффективности. Полученные оптимальные значения были аппроксимированы и представлены в виде функциональной зависимости ($L_0 = 2,95 \cdot V + (1,5 \cdot L - 8,2 \cdot K_{\sigma} - 3,26)$) параметра метода от значений длины базы, коэффициента базы и скорости ДСМ.

6. Результаты теоретических исследований могут быть распространены на различные типы ДСМ с различными видами рулевого управления и различным расположением РО при создании систем автономного управления движением по заданной траектории.

ГЛАВА 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

6.1. Экспериментальное подтверждение адекватности математической модели

Комплексный подход, используемый в данной работе, предусматривает как теоретические, так и экспериментальные исследования. Одним из этапов исследования является подтверждение адекватности математической модели рабочего процесса ДСМ.

В качестве объекта исследования был выбран серийный автогрейдер ГС-14.02. Исследования проведены в г. Омске.

Основываясь на методике, описанной в разделе 2, был проведен активный эксперимент.



Рисунок 6.1.1 – Автогрейдер ГС-14.02 на полигоне

Проверка адекватности математической модели в динамическом режиме осуществлялась путем сравнения траекторий движения ДСМ, полученных теоретическим путем с траекториями движения, полученными экспериментально.

Для подтверждения адекватности математической модели рабочего процесса ДСМ формировались различные воздействия на рулевое управление автогрейдера.

В качестве входных воздействий были приняты: поворот передних колес на угол 10° , 20° и 30° .

В качестве контролируемых точек были взяты правый и левый край РО. Положение центра РО вычислялось как среднее значение координат правого и левого края РО.

На полигоне была нанесена размерная шкала с шагом 5 м при помощи дорожных конусов (рисунок 6.1.1). Видеосъемка велась с высоты 40 м с помощью квадрокоптера с установленной видеокамеры высокого разрешения. Значения углов поворота отдельных элементов автогрейдера измерялись при помощи 3-осных акселерометров-гироскопов (рисунок 6.1.2). Обработка записанных в ходе эксперимента сигналов производилась на ПЭВМ с помощью фильтра Калмана [169]. Далее на ПЭВМ был произведен покадровый просмотр и построены графики движения контролируемых точек автогрейдера (рисунок 6.1.3).



Рисунок 6.1.2 – Бортовая измерительная аппаратура

На рисунке 6.1.4 представлены теоретические траектории движения с точками, полученными в ходе экспериментальных исследований.



Рисунок 6.1.3 – Кадр из съемки эксперимента при повороте автогрейдера

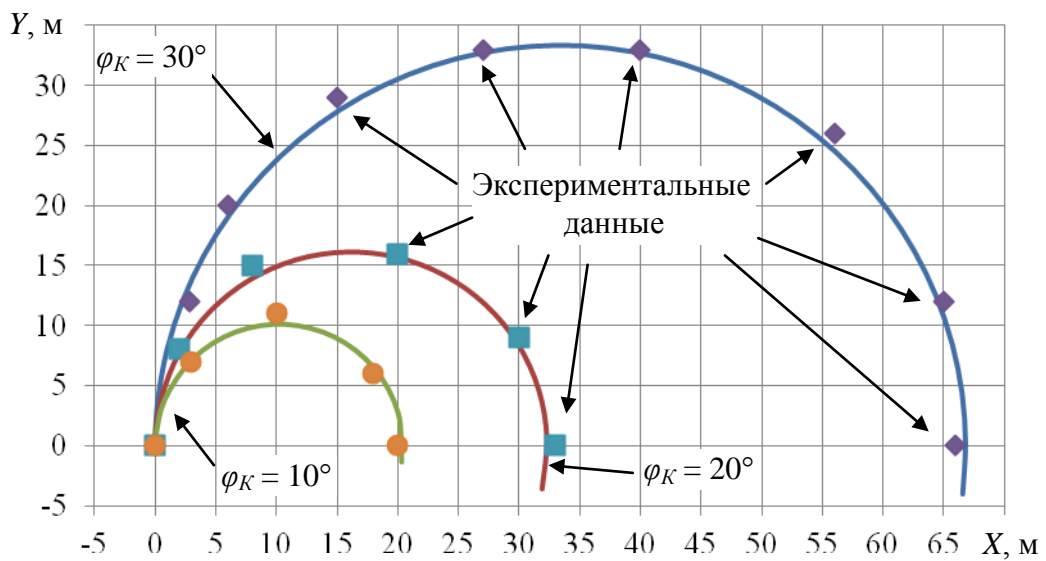


Рисунок 6.1.4 – Траектория движения автогрейдера ГС-14.02

$$(z_0 = 0; x_0 = 0; \gamma_0 = 0^\circ, \varphi_K = 10, 20, 30^\circ)$$

Вторым этапом экспериментальных исследований являлась проверка адекватности математической модели при изменяющемся входном воздействии. Оператор автогрейдера выполнял маневр «переставка» с изменением траектории движения на 1 м левее при планировке поверхности грунта с углом захвата ρ_0 45° . Воздействие на рулевое колесо и угол поворота передних колес были

измерены с помощью бортовой измерительной аппаратуры. Переходная характеристика выходного сигнала датчика угла поворота передних колес представлена на рисунке 6.1.5.

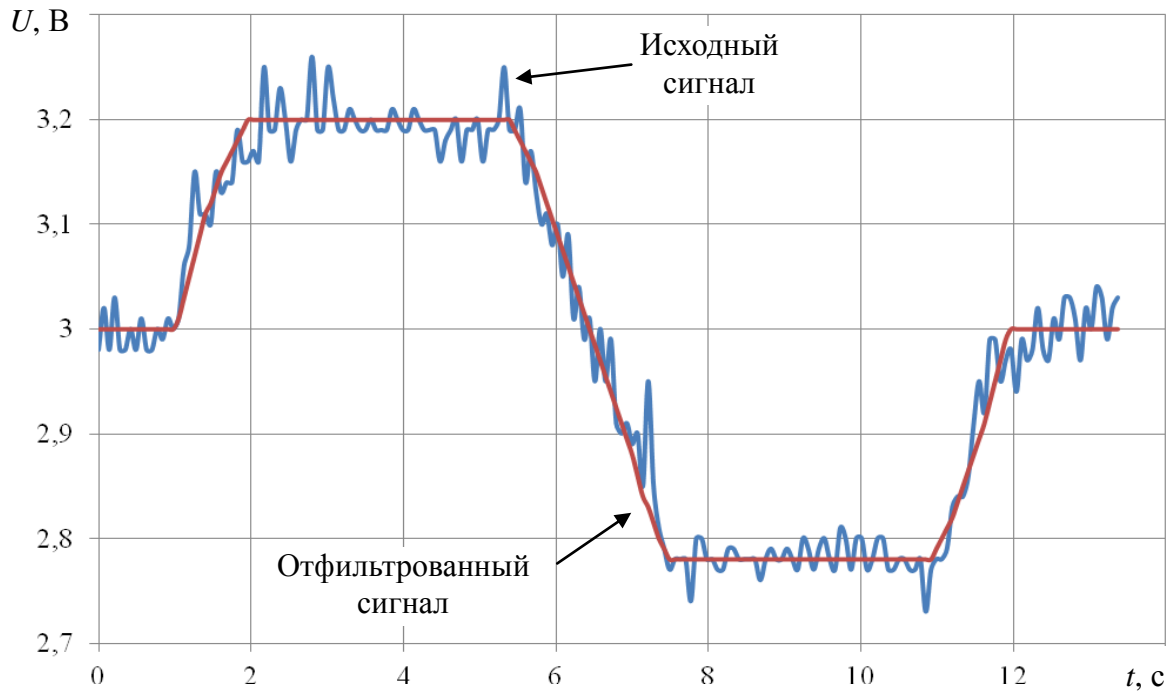


Рисунок 6.1.5 – Переходная характеристика выходного сигнала датчика угла поворота передних колес при выполнении маневра «переставка»

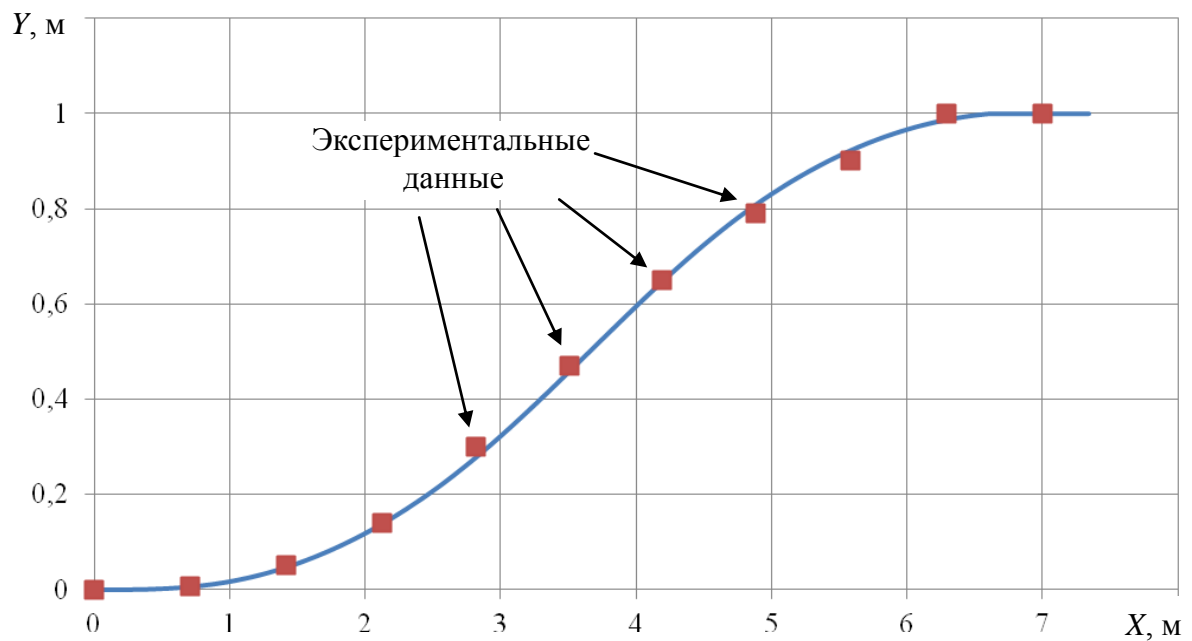


Рисунок 6.1.6 – Траектория движения автогрейдера ГС-14.02 при выполнении маневра «переставка»

Полученный сигнал был использован в качестве входного воздействия на математическую модель для получения теоретической траектории движения автогрейдера. На полученную зависимость были наложены точки траектории движения автогрейдера, полученные экспериментально (рисунок 6.1.6).

Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных характеристик подтвердил адекватность разработанной математической модели рабочего процесса ДСМ (относительная погрешность составила менее 7%). Таким образом, данная математическая модель может быть использована для теоретических исследований, с целью выбора основных параметров СУ движением ДСМ.

6.2. Практические рекомендации и технические решения

На основании проведенных исследований, была предложена структурная схема перспективной системы автономного управления колесной ДСМ (рисунок 6.2.1).

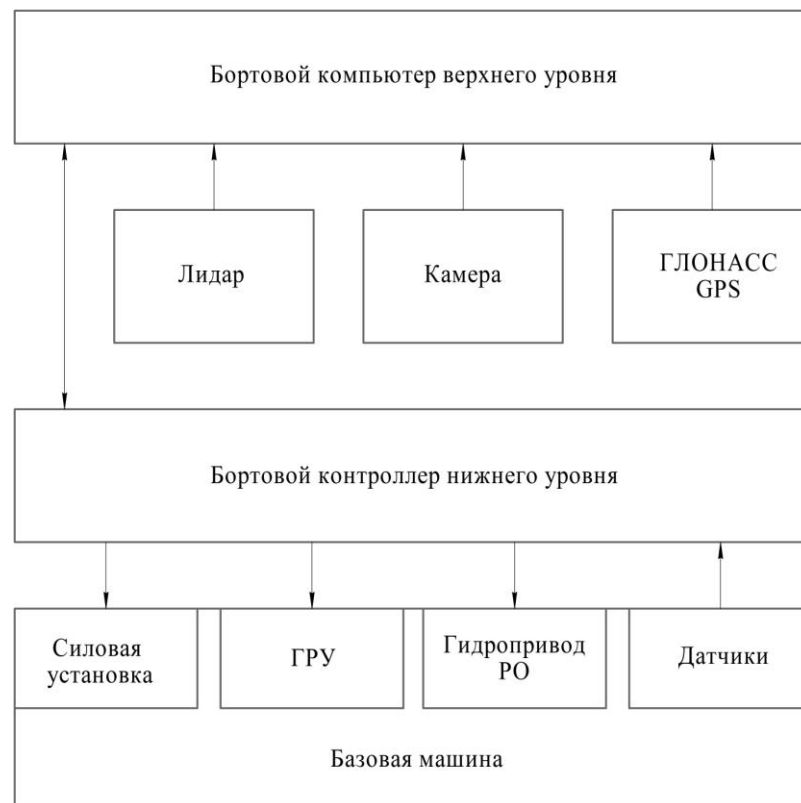


Рисунок 6.2.1 – Структурная схема перспективной системы автономного управления колесной дорожно-строительной машины

Система, представленная на рисунке 6.2.1, является двухуровневой. Верхний уровень представлен бортовым компьютером. В его задачи входит наиболее сложные и требовательные процессы:

- обработка информации с лидара, камеры и сигналов ГНСС;
- реализация метода построения траектории;
- определения вектора состояния ДСМ;
- выработка управляющих сигналов на управление базовой машиной;
- картографирование пройденного пути.

Предлагаемый состав оборудования для реализации перспективной системы автономного управления ДСМ представлен ниже.

Бортовой компьютер

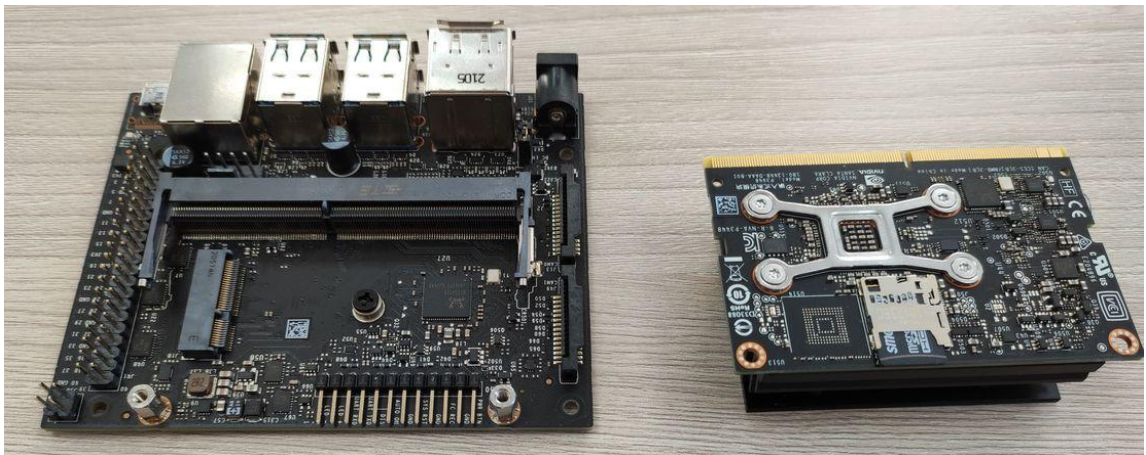


Рисунок 6.2.2 – Встраиваемый модуль NVIDIA Jetson Nano [238]

В качестве бортового компьютера предполагается использовать встраиваемый модуль NVIDIA Jetson Nano (рисунок 6.2.2). Данный выбор обусловлен требованием большой вычислительной мощности для обработки информации с лидара и камеры.

Бортовой контроллер

В качестве бортового контроллера предполагается использовать 32-битный микроконтроллер семейства STM32- производства STMicroelectronics (рисунок 6.2.3).



Рисунок 6.2.3 – Плата STM32F407 Discovery Kit [239]

Камеры

Одним из способов решения задачи локальной навигации является применение камер глубины и системы слежения (рисунки 6.2.4 и 6.2.5).



Рисунок 6.2.4 – Камера глубины Intel RealSense Depth Camera D455 [240]



Рисунок 6.2.5 – Stereo камера Stereolabs ZED Stereo camera

Лидар

Для получения информации о препятствиях, возникающих на пути машины предлагается использовать лидар (рисунок 6.2.6).



Рисунок 6.2.6 – Лидар Livox Mid 70 LiDar Sensor [241]

Приемник ГНСС

GNSS-приемник Trimble R10 410-470 МГц получает поправки по радиоканалу или напрямую со спутника и компенсирует ошибки при неточной установке прибора с помощью функции Trimble SurePoint. 440-канальная плата обеспечивает работу со спутниковыми системами GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou и SBAS [235].



Рисунок 6.2.7 – GNSS-приемник Trimble R10 [235]

Предложенная структурная схема и комплект аппаратуры для технической реализации системы автономного управления были успешно апробированы в ходе выполнения совместного проекта ФГБОУ ВО «СибАДИ» и Университета

Иннополис в 2021 году по созданию автономной малогабаритной коммунальной машины (рисунки 6.2.8-6.2.9).



Рисунок 6.2.8 – Фрагмент данных с камеры глубины во время испытаний

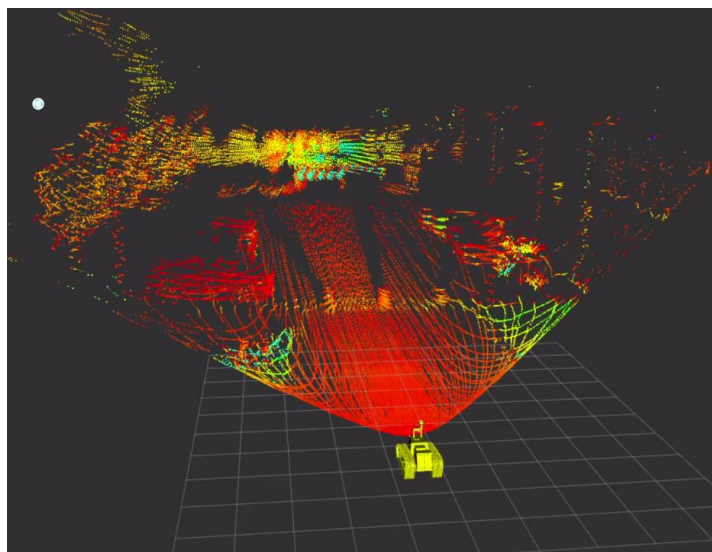


Рисунок 6.2.9 – Фрагмент данных с лидара во время испытаний

Инженерная методика создания системы автономного управления дорожно-строительной машины

Проведенные в работе теоретические исследования легли в основу разработанной инженерной методики создания системы автономного управления ДСМ. Алгоритм методики представлен на рисунке 6.2.10.



Рисунок 6.2.10 – Алгоритм инженерной методики создания системы автономного управления дорожно-строительной машины

Методика заключается в следующем:

1. Выбрать базовую машину, для которой создается система автономного управления.

2. Задать параметры базовой машины (длина базы L , коэффициент базы K_b , минимальный радиус поворота R_{min}).

3. Задать исходные данные для решения математической модели:

- расположение РО (перед базой, в базе, за базой);
 - тип ГРУ (передние управляемые колеса, ШСР, передние управляемые колеса и ШСР).

4. Сформировать вектор состояния машины $\bar{R} = [x_1, y_1, z_1, \gamma_1, \vartheta_1, \varphi_1, \varphi_K, \varphi_P, z_{PO}, \varphi_{PO}, \gamma_{PO}, V]$ с учетом особенностей выбранной машины, типа рулевого управления, расположения РО и т.д.

5. Выбрать компоненты технической реализации системы автономного управления по предложенной структурной схеме (рисунок 6.2.1) в соответствии с вектором состояния.

6. Выбрать метод управления движением:

- метод «чистое преследование»;
 - метод «Стэнли»;
 - копирный метод.

7. Рассчитать оптимальные коэффициенты метода по прилагаемым функциональным зависимостям:

- для метода «чистое преследование» $L_0 = (1,6 + 0,04 \cdot L) \cdot V + (3,2 - 5 \cdot K_b + 0,5 \cdot L)$;

- для метода «Стэнли» $k = -349,9 + 582,3 \cdot K_b + 58,98 \cdot L$;

- для копирного метода $L_0 = 1,77 \cdot V + (3,55 - 8,2 \cdot K_b + 0,71 \cdot L)$,

$k_y = V^5 (1,7856 + 1,085 \cdot K_b - 0,1308 \cdot L) + (1,247 - 0,7772 \cdot K_b + 0,1154 \cdot L)$.

8. Реализовать выбранный метод управления по соответствующей структурной схеме с учетом оптимальных коэффициентов соответствующего метода (рисунки 6.2.11-6.2.13).

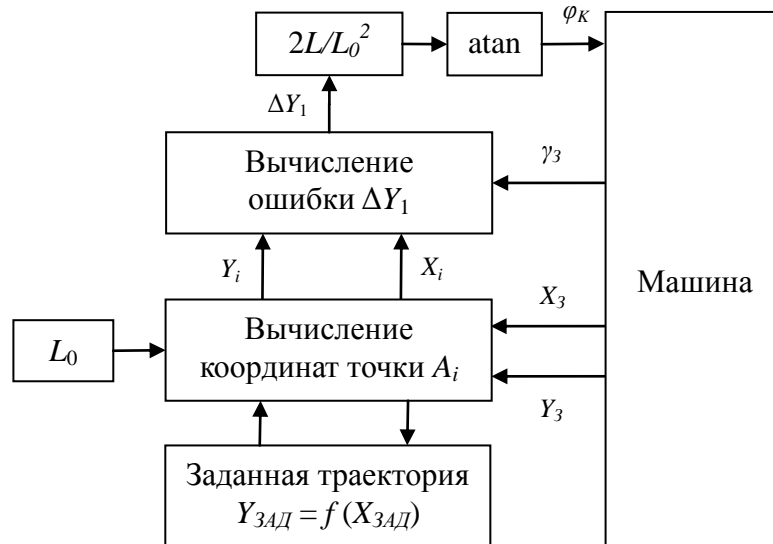


Рисунок 6.2.11 – Структурная схема метода «чистое преследование»

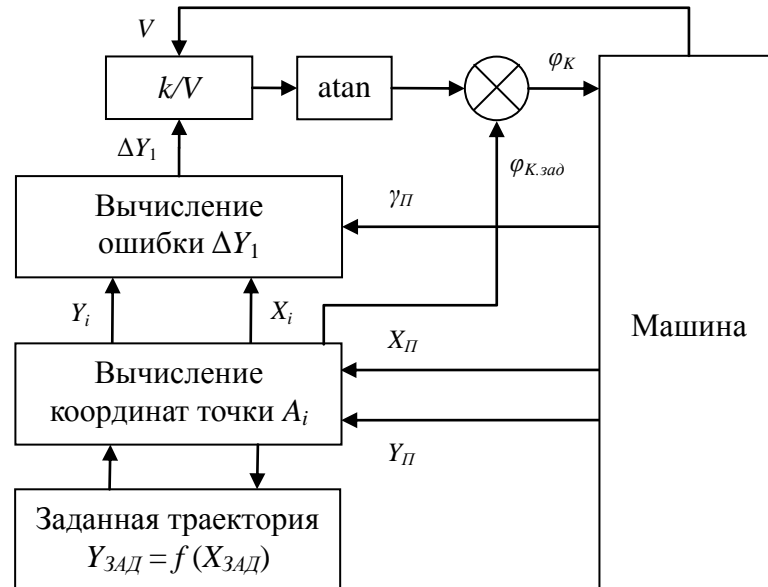


Рисунок 6.2.12 – Структурная схема метода Стэнли

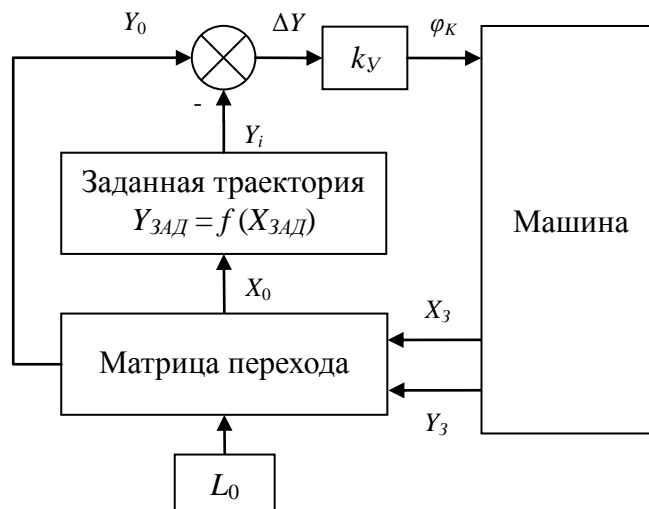


Рисунок 6.2.13 – Структурная схема копирного метода

6.3. Выводы по шестой главе

1. Разработанная методика проведения экспериментальных исследований позволила провести исследования динамических характеристик ДСМ, подтвердивших адекватность математической модели рабочего процесса ДСМ.

2. Подтверждена адекватность разработанной математической модели рабочего процесса дорожно-строительной машины. Расхождения экспериментальных и теоретических значений не превысили: при проведении активного эксперимента – 5 %; при проведении пассивного эксперимента – 7 %.

3. Предложены практические рекомендации и технические решения для создания перспективных систем автономного управления колесными ДСМ, включающие в себя: разработанную двухуровневую структурную схему, инженерную методику создания перспективных систем автономного управления дорожно-строительными машинами, комплект аппаратуры для технической реализации. Создание такой системы управления позволит исключить человека-оператора из контуров управления, реализовать принципиально новый научно-обоснованный подход к управлению дорожно-строительными машинами.

ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана новая концепция автономного управления колесными дорожно-строительными машинами на основе классификации дорожно-строительных машин, проведенного анализа рабочего процесса и идентификации функций человека-оператора. Разработаны блок-схемы машины с серийной системой управления и машины с перспективной системой автономного управления, которая управляет не только рабочим органом, но и движением машины.

2. Предложена классификация существующих систем управления дорожно-строительными машинами на основе идентификации функций управления, включающая в себя 4 класса, в которую был добавлен новый класс перспективных систем автономного управления, реализующий дополнительную функцию управления движением дорожно-строительной машины.

3. Обоснована методика оценки эффективности рабочего процесса дорожно-строительной машины, оснащенной системой автономного управления. Предложен интегральный критерий эффективности, позволяющий оценить точность движения дорожно-строительной машины по заданной траектории при использовании различных методов управления.

4. Разработана математическая модель сложной динамической системы рабочего процесса дорожно-строительной машины, состоящая из подсистем: базовая машина; микрорельеф; рабочий орган – обрабатываемая среда; ходовое оборудование; гидропривод рабочего органа; гидравлическое рулевое управление, силовая установка, система автономного управления, позволяющая моделировать требуемые траектории движения колесной дорожно-строительной машины с различным расположением рабочего органа при формировании земляного полотна. Адекватность математической модели экспериментально подтверждена, расхождения экспериментальных и теоретических значений не превышают: при проведении активного эксперимента – 5 %; при проведении пассивного эксперимента – 7 %.

5. Разработан метод моделирования трехмерного микрорельефа для теоретических исследований криволинейного движения дорожно-строительных машин. На основе метода создана программа для ЭВМ «Модуль генерации трехмерного микрорельефа для теоретических исследований дорожно-строительных машин», зарегистрированная в установленном порядке (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022612332).

6. Разработан метод построения траектории движения, учитывающий кинематические ограничения колесных дорожно-строительных машин, координаты путевых точек и азимуты направления дальнейшего движения. На основе метода создана программа для ЭВМ «Модуль построения траектории движения дорожно-строительной машины», зарегистрированная в установленном порядке (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022612587).

7. Предложено новое понятие: «вектор состояния дорожно-строительной машины» – это вектор параметров, описывающих текущее положение дорожно-строительной машины и рабочего органа, необходимых и достаточных для реализации методов автономного управления дорожно-строительными машинами. Обоснованы варианты комплектов источников первичной измерительной информации для формирования «вектора состояния».

8. Проведенные теоретические исследования метода «чистое преследование» (Pure Pursuit) позволили выявить функциональную зависимость оптимального значения параметра «дальность видимости» от длины базы и коэффициента базы дорожно-строительной машины ($L_0 = (1,6 + 0,04 \cdot L) \cdot V + (3,2 - 5 \cdot K_0 + 0,5 \cdot L)$). В результате, метод «чистое преследование» был модернизирован путем введения новой переменной – скорости, что позволило повысить точность работы при увеличении скорости машины. Значения критерия эффективности метода «чистое преследование» оказались в диапазоне $E_T = 1,781 \dots 7,247$ при значениях скорости машины $V = 0,5 \dots 2,5$ м/с

9. Проведенные теоретические исследования метода «Стэнли» (Stanley) позволили выявить функциональную зависимость оптимального значения коэффициента усиления от длины базы и коэффициента базы дорожно-

строительной машины ($k = -349,9 + 582,3 \cdot K_{\sigma} + 58,98 \cdot L$). Таким образом, метод «Стэнли» был адаптирован для управления колесной дорожно-строительной машиной. Значения критерия эффективности метода «Стэнли» оказались в диапазоне $E_T = 3,851 \dots 9,82$ при значениях скорости машины $V = 0,5 \dots 2,5$ м/с.

10. Разработан новый копирный метод управления, для которого на основании проведенных теоретических исследований были получены функциональные зависимости оптимальных значений параметров метода управления ($k_v = V^5(1,7856 + 1,085 \cdot K_{\sigma} - 0,1308 \cdot L) + (1,247 - 0,7772 \cdot K_{\sigma} + 0,1154 \cdot L)$, $L_0 = 1,77 \cdot V + (3,55 - 8,2 \cdot K_{\sigma} + 0,71 \cdot L)$) от основных параметров дорожно-строительной машины (длина базы, коэффициент базы, скорость). Значения критерия эффективности копирного метода оказались в диапазоне $E_T = 1,717 \dots 5,314$ при значениях скорости машины $V = 0,5 \dots 2,5$ м/с, что лучше значений метода «чистое преследование» ($E_T = 1,781 \dots 7,247$) в среднем на 23%, и лучше значений метода «Стэнли» ($E_T = 3,851 \dots 9,82$) в среднем на 54%.

11. Предложены практические рекомендации и технические решения для создания перспективных систем автономного управления колесными дорожно-строительными машинами, включающие в себя: разработанную двухуровневую структурную схему, инженерную методику создания перспективных систем автономного управления дорожно-строительными машинами, комплект аппаратуры для технической реализации. Практические рекомендации внедрены в АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» (акт внедрения от 12.05.2022) и в учебный процесс ФГБОУ ВО «СибАДИ» (акт внедрения от 12.05.2022). Создание системы автономного управления позволит исключить человека-оператора из контуров управления, реализовать принципиально новый научно-обоснованный подход к управлению дорожно-строительными машинами. Результаты исследований могут быть распространены на различные модели колесных дорожно-строительных машин с различными типами рулевого управления и различным расположением рабочего органа при создании систем автономного управления.

В качестве направлений дальнейших исследований предполагается адаптация разработанного копирного метода для управления другими типами дорожно-строительных машин, его модернизация путем внедрения более совершенных законов регулирования и разработка концепции управления комплектом дорожно-строительных машин на одной площадке.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ДСМ – дорожно-строительная машина;
- СУ – система управления;
- РО – рабочий орган;
- ШСР – шарнирно-сочлененная рама;
- ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система;
- ЧО – человек-оператор;
- ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина;
- ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система;
- GPS (Global Positioning System) – глобальная навигационная система;
- RTK (Real Time Kinematic) – кинематика реального времени;
- НС – навигационный спутник;
- НВО – навигационно-временное обеспечение;
- ПКА – подсистема космических аппаратов;
- ПКУ – подсистема контроля и управления;
- БЭВЧ – бортовой эталон времени и частоты;
- КВЦ – координационно-вычислительный центр;
- СТИ – станция траекторного измерения;
- НАП – навигационная аппаратура потребителей;
- СРНС – спутниковая радионавигационная система;
- ЧВП – частотно-временные поправки;
- ГРУ – гидравлическое рулевое управление;
- ХО – ходовое оборудование;
- DGNSS (Differential Global Navigation Satellite System) – дифференциальный режим работы ГНСС;
- ГМОС – гидромотор обратной связи;
- ДВС – двигатель внутреннего сгорания.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}Z_{ЗЕМ}$ – неподвижная правая ортогональная система координат, жестко привязанная к Земле;

$O_0X_0Y_0Z_0$ – инерциальная система координат;

$O_iX_iY_iZ_i$ – локальная система координат i -го звена;

X, Y, Z – оси правых ортогональных систем координат;

x, y, z – большие перемещения вдоль соответствующих осей;

$\gamma, \varphi, \vartheta$ – большие значения углов поворота соответственно вокруг осей OX, OY, OZ ;

q_j – большое значение j -ой координаты;

$q_j \equiv dq_j$ – малое значение j -ой координаты;

\ddot{q}, \dot{q}, q – соответственно ускорение, скорость, координата;

i – индекс номера звена ($i = 1 \dots k \dots 7$);

j – индекс номера обобщенной координаты ($j = 1 \dots l \dots 14$);

r – индекс номера силы реакции грунта на элементы ходового оборудования и рабочий орган ($r = 1 \dots m \dots 7$);

u – индекс номера упруговязкого элемента ($u = 1 \dots n \dots 10$);

\bar{F} – вектор силы;

f – линейная функция;

K – кинетическая энергия;

P – потенциальная энергия;

Φ – диссипативная функция;

\bar{R}_i – вектор координат точки в i -ой системе координат;

l_x, l_y, l_z – величины параллельного переноса начала i -ой системы координат вдоль соответствующих осей X, Y, Z ;

\bar{R}'_i – вектор скорости i -ой точки;

\bar{G} – вектор направления сил;

\bar{R}_i^T – транспонированный вектор;

- A_i – блочная матрица размера 4×4 ;
- T_i – матрица перехода из i -ой системы координат в инерциальную систему координат, размера 4×4 ;
- τ_i – матрица поворота осей системы координат размером 3×3 ;
- L_i – матрица параллельного переноса начала системы координат размером 3×1 ;
- 0 – нулевая матрица размером 1×3 ;
- 1 – единичная матрица размером 1×1 ;
- $E_x, E_y, E_z, E_\varphi, E_g, E_\gamma$ – матрицы дифференцирования размером 4×4 ;
- D_x, D_y, D_z – матрицы направления размером 4×4 ;
- $\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z$ – матрицы упруговязких элементов размером 4×4 ;
- A, B, C – матрицы коэффициентов системы дифференциальных уравнений размером 14×14 ;
- m_i – масса i -го звена;
- C – коэффициент упругости;
- b – коэффициент вязкого трения;
- J_x, J_y, J_z – моменты инерции;
- J_{xy}, J_{yz}, J_{zx} – центробежные моменты инерции;
- ρ_x, ρ_y, ρ_z – радиусы инерции;
- $\rho_{xy}, \rho_{yz}, \rho_{zx}$ – центробежные радиусы инерции;
- g – ускорение свободного падения;
- N_u – матрица упругости размером 4×4 ;
- B_u – матрица вязкого трения размером 4×4 ;
- H_i – матрица инерционности размером 4×4 ;
- a_{jv}, b_{jv}, c_{jv} – коэффициенты системы дифференциальных уравнений;
- λ – деформация упруговязкого элемента;
- L – длина базы ДСМ;
- φ_K – угол поворота передних колес;
- φ_P – угол складывания полурам;
- K_δ – коэффициент базы ДСМ;

V – скорость ДСМ;

L_1 – расстояние от передней оси до РО;

L_2 – расстояние от РО до задней оси;

k – коэффициент усиления в методе Стэнли;

k_y – коэффициент усиления в копирном методе;

L_0 – дальность видимости в методе «чистое преследование», вынос точки копирования в копирном методе;

F_{PO} – сила сопротивления копанию грунта на РО;

F_T – низкочастотная составляющая силы сопротивления копанию (тренд);

F_ϕ – высокочастотная составляющая силы сопротивления копанию (флюктуация);

R_3 – радиус поворота центральной точки заднего моста;

R_{II} – радиус поворота центральной точки переднего моста;

T_i – сила тяги на ведущих колесах машины;

F_{rix} – продольная сила реакции на колесах машины;

F_{riy} – поперечная сила реакции на колесах машины;

J – момент инерции машины;

L_{1p} – длина передней полурамы машины;

L_{2p} – длина задней полурамы машины;

L_{3p} – ширина машины;

L_6 – длина балансира;

L_0 – расстояние от оси балансира до центра масс машины;

f_{cy} – коэффициент сцепления шины с грунтом;

$f_{cy,бок}$ – коэффициент сцепления колеса с опорной поверхностью в боковом направлении по отношению к направлению качения;

V_{II} – скорость перемещения штока гидроцилиндра;

P_i, P_j – давления соответственно в напорной и сливной полостях гидроцилиндра;

Q_i, Q_j – расходы жидкости соответственно в напорной и сливной гидроцилиндра;

S_i, S_j – рабочие площади соответственно в напорной и сливной полостях гидроцилиндра;

b_{TP} – коэффициент вязкого трения;

$F_{Ц}$ – внешние силы, приведенные к штоку гидроцилиндра;

$k_{УПР,i}, k_{УПР,j}$ – коэффициенты упругости соответственно напорной и сливной полостей гидроцилиндра;

$\Delta V_{Ц}$ – “мертвый” объем поршневой полости гидроцилиндра;

S – положение штока гидроцилиндра, характеризующее объем поршневой полости;

$\delta_{Ц}$ – толщина стенки гидроцилиндра;

$E_{Ц}$ – модуль упругости материала стенки гидроцилиндра;

$\Delta V_{Ш}$ – “мертвый” объем штоковой полости гидроцилиндра;

S_{MAX} – максимальное значение хода штока гидроцилиндра;

Q_{PH} и Q_H – расходы, соответственно, на выходе и на входе напорного канала золотника;

P_{PH} и P_H – давления, соответственно на выходе и на входе напорного канала золотника;

f_H – площадь проходного сечения местных сопротивлений в напорном канале золотника;

$\rho_{Ж}$ – плотность рабочей жидкости;

J – приведенный к валу двигателя момент инерции вращающихся частей (коленчатый вал и присоединенные к нему движущиеся массы);

ω – угловая скорость вращения вала;

M – эффективный вращающий момент на валу;

M_C – момент сопротивления на валу;

E – восстанавливающая сила пружины;

z – перемещение муфты регулятора;

ψ – перемещение чашки пружины (управляющее воздействие);

R_{min} – минимальный радиус поворота машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahn, J., Shin, S., Kim, M. et al. Accurate Path Tracking by Adjusting Look-Ahead Point in Pure Pursuit Method. *Int.J Automot. Technol.* 22, 119–129 (2021). 10.1007/s12239-021-0013-7.
2. Alessandro De Luca, Giuseppe Oriolo. *Feedback Control of a Nonholonomic Car-like Robot.* 2004.
3. Alexey S. Matveev, Michael C. Hoy, Andrey V. Savkin, A globally converging algorithm for reactive robot navigation among moving and deforming obstacles, *Automatica*, Volume 54, 2015, Pages 292-304, ISSN 0005-1098, <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.02.012>.
4. Fue, Kadege & Porter, Wesley & Barnes, Edward & Li, Changying & Rains, Glen. (2020). Autonomous Navigation of a Center-Articulated and Hydrostatic Transmission Rover using a Modified Pure Pursuit Algorithm in a Cotton Field. *Sensors.* 20. 4412. 10.3390/s20164412.
5. Jarrod M. Snider Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking Technical Report CMU-RI-TR-09-08, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, February 2009.
6. Lapierre, L., Zapata, R., Lepinay, P. Combined path-following and obstacle avoidance control of a wheeled robot (2007) *International Journal of Robotics Research*, 26 (4), pp. 361-375. DOI: 10.1177/0278364907076790
7. Liu, Jia & Yang, Zhiheng & Huang, Zhejun & Li, Wenfei & Dang, Shaobo & Li, Huiyun. (2021). Simulation Performance Evaluation of Pure Pursuit, Stanley, LQR, MPC Controller for Autonomous Vehicles. 1444-1449. 10.1109/RCAR52367.2021.9517448.
8. Matthew J. Barton. *Controller Development and Implementation for Path Planning and Following in an Autonomous Urban Vehicle.* Undergraduate thesis, University of Sydney, November 2001.

9. Matveev, A. S. A globally converging algorithm for reactive robot navigation among moving and deforming obstacles / A. S. Matveev, M. C. Hoy, A. V. Savkin // *Automatica*. – 2015. – Vol. 54. – P. 292-304. – DOI 10.1016/j.automatica.2015.02.012.
10. Ola Ringdahl. Techniques and Algorithms for Autonomous Vehicles in Forest Environment. Licentiate Thesis. Department of Computing Science Umea University, Sweden, 2007.
11. Omead Amidi. Integrated Mobile Robot Control. Technical Report CMU-RI-TR-90-17, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, May 1990.
12. P.B. Sujit, Srikanth Saripalli, J.B. Sousa. An Evaluation of UAV Path Following Algorithms. 2013 European Control Conference (ECC) July 17-19, 2013, Zurich, Switzerland
13. R. Craig Coulter. Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm. Technical Report CMU-RI-TR-92-01, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, January 1992.
14. S. Thrum, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny, G. Hoffmann, K. Lau, C. Oakley, M. Palatucci, V. Pratt, P. Stang, S. Strohband, C. Dupont, L.-E. Jendrossek, C. Koelen, C. Markey, C. Rummel, J. van Niekerk, E. Jensen, P. Alessandrini, G. Bradski, B. Davies, S. Ettinger, A. Kaehler, A. Nefian, and P. Mahoney. Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge. *Journal of Field Robotics* 23 (9), 661-692. 2006.
15. Sukharev, R.Y. Trajectory plotting algorithm for a self-driving road grader / R. Y. Sukharev // *Journal of Physics: Conference Series*, Vladivostok, 07–08 октября 2021 года. – Vladivostok, 2021. – P. 012181. – DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012181.
16. Wu, Yiyang & Xie, Zhijiang & Lu, Ye. (2021). Steering Wheel AGV Path Tracking Control Based on Improved Pure Pursuit Model. *Journal of Physics: Conference Series*. 2093. 012005. 10.1088/1742-6596/2093/1/012005.
17. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

18. Алексеев В.А. Исследование системы стабилизации положения рабочего органа бульдозера на базе колесного тягача. Дис. ... канд. техн. наук. – Омск: СибАДИ, 1973. – 142 с.

19. Алексеева Т.В. Разработка следящих систем управления рабочим процессом землеройно-транспортных машин с целью повышения их эффективности. – Омск, 1974. – 175 с.

20. Алексеева Т.В., Щербаков В.С. Оценка и повышение точности землеройно-транспортных машин: Учеб. пособие. – Омск: СибАДИ, 1981. – 99 с.

21. Алексеева Т.В., Щербаков В.С., Байкалов В.А., Палеев В.А. Система управления рабочим органом планировочной машины // А.с. 977621 (СССР).- Оpubл. в Б.И., 1982, №44.

22. Алексеева Т.В., Щербаков В.С., Бирюков С.Т., Гольчанский М.А. Гидромеханические САУ положением рабочего органа и вождения гусеничной машины // Вопросы создания систем и агрегатов гидроавтоматики сельскохозяйственных машин: Тез. докл. Всесоюз. конф.- М., 1984, с.57-58.

23. Алексеева Т.В., Щербаков В.С., Галдин Н.С., Шерман Э.Б. Основы машиностроительной гидравлики: Уч. пособие. – Омск: ОмПИ, 1986. – 87 с.

24. Амельченко В.Ф. Основные положения динамики систем управления процессом копания бульдозерными агрегатами. – Омск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1972. – 158 с.

25. Амельченко В.Ф. Основы динамики комплекса «землеройно-транспортная машина – рабочий процесс» и синтез систем управления: Дис... д-ра. техн. наук. – Омск: СибАДИ, 1984. – 343 с.

26. Амельченко В.Ф. Управление рабочим процессом землеройно-транспортных машин. – Зап.-сиб. кн. изд-во, Омское отделение, 1975. – 232 с.

27. Амельченко В.Ф., Евдокимов Б.Л., Алексеева Т.В., Александров Ю.В. Проектирование систем управления рабочим процессом землеройно-транспортных машин. Ч.1и2. Зап.-сиб. кн. изд-во, Омское отделение, 1972. - 342 с.

28. Ануфриев И.Е., Смирнов А. Б., Смирнова Е. Н. MATLAB 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

29. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем: приемники-потребители навигационной информации / А.Д. Борискин, А.В. Вейцель, В.А. Вейцель, М.И. Жодзишский, Д.С. Милютин; Под ред. М.И. Жодзишского. - М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. - 292 с. ISBN 978-5-7035-2233-2

30. Артеменко, М. Н. Тенденции развития мобильных беспилотных роботизированных комплексов. Опыт отечественных и зарубежных производителей / М. Н. Артеменко, П. А. Корчагин, И. А. Тетерина // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2019. – Т. 16. – № 4(68). – С. 416-430.

31. Артемьев К. А. Теория резания грунтов землеройно-транспортными машинами: Учеб. пособие. – Омск: ОмПИ, 1989. – 80 с.

32. Архангельский В.Н., Гульяншин А.В., Даугелло В.А., Савин Г.Е. Выбор местоположения шарнира и угла складывания основной рамы автогрейдера // Строительные и дорожные машины. 1986. № 10. С. 7-8.

33. Афанасьев В.Л., Хачатуров А.А. Статистические характеристики микропрофилей автомобильных дорог и колебаний автомобиля // Автомобильная промышленность. - 1966.- № 2. -С.21-23.

34. Аюпов В.В. Оценка маневренности и устойчивости автопоездов: автореф. дис.. канд. техн. наук / В.В. Аюпов. М. 1986. 16 с.

35. Байкалов В.А. Исследование системы управления рабочим органом автогрейдера с целью повышения эффективности профилировочных работ: Дис. ... канд. техн. наук. – Омск: СибАДИ, 1981. – 189 с.

36. Бакалов А.Ф. Совершенствование системы стабилизации положения рабочего органа автогрейдера: Дис. ... канд. техн. наук. – Омск: СибАДИ, 1986. – 231 с.

37. Баладинский В.А. Динамическое разрушение грунтов рабочими органами землеройных машин: Дисс....докт.техн.наук.- Киев, 1979. – 396 с.

38. Баловнев В.И. Дорожно-строительные машины с рабочими органами интенсифицирующего действия.– М.: Машиностроение, 1981.– 223 с.

39. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин.– М.: Машиностроение, 1994.– 432 с.

40. Баловнев В.И. Основные направления повышения эффективности и интенсификации дорожно-строительных машин // Интенсификация рабочих процессов дорожных машин, 1981. С. 4-11.

41. Баловнев В.И., Хмара Л. А. Интенсификация разработки грунтов в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1993.– 383 с.

42. Баловнев В.И., Хмара Л.А. Повышение производительности машин для земляных работ: Производств. издание. – М.: Транспорт, 1992. – 136 с.

43. Беляев В.В. Основы оптимизационного синтеза при проектировании землеройно-транспортных машин. Издание 2-е, доп. и перераб. – Омск: Изд-во ОТИИ, 2006. – 143 с.

44. Беляев В.В. Повышение точности планировочных работ автогрейдерами с дополнительными опорными элементами рабочего органа: Дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 1987. – 230 с.

45. Беркович М.В. Использование базовых станций ГЛОНАСС для увеличения точности позиционирования строительной техники / М. В. Беркович, Р. Ю. Сухарев // Фундаментальные и прикладные науки - основа современной инновационной системы : Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Омск, 02–13 февраля 2015 года. – Омск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)", 2015. – С. 348-353.

46. Беркович М.В. Перспективы использования ГЛОНАСС для управления строительной и нефтегазовой техникой / М. В. Беркович, Р. Ю. Сухарев // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки : Материалы международной научно-практической конференции [Электронный ресурс], Омск,

15–16 декабря 2014 года. – Омск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)", 2014. – С. 52-55.

47. Бояркина И.В. Развитие механики рабочих процессов одноковшовых фронтальных погрузчиков : специальность 05.05.04 "Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Бояркина Ирина Владимировна. – Омск, 2013. – 448 с.

48. Бояркина И.В. Разработка и исследование математических моделей рабочего процесса автогрейдера как составной части САПР: дис. канд. техн. наук: 05.05.04 / Бояркина Ирина Владимировна. Омск. 1992. 241 с.

49. Бузин Ю.М. Системный подход – основа анализа и синтеза рабочего процесса землеройно-транспортной машины / Строительные и дорожные машины. – 2002. – №10. – С. 36-41.

50. Васильченко В.А. Гидравлическое оборудование мобильных машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 302 с.

51. Васьковский А.М. Исследование рабочего процесса землеройно-транспортных машин в связи с вопросами их автоматизации: Дис. ... канд.техн.наук. – М.: 1968. – 126 с.

52. Вентцель Е. С., Овчаров В. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения.– М.: Высшая школа, 2000.– 383 с.

53. Вентцель Е.С. Прикладные задачи теории вероятностей / Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. – М.: Радио и связь, 1983. – 416 с.

54. Вершинский Л.В. Повышение эффективности колесного фронтального погрузчика с шарнирно-сочлененной рамой путем улучшения его поворотливости: дис.. канд. техн. наук: 05.20.01, 05.05.03 / Вершинский Леонид Валерьевич. Челябинск. 2008. 128 с.

55. Ветров Ю.А. Расчет сил резания и копания грунтов. – Киев: Изд-во киевского университета, 1965. – 167 с.

56. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. – М.: Машиностроение, 1971. – 360 с.
57. Ветров Ю.А., Баландинский В.Л. Машины для специальных земляных работ: Учеб. пособие для вузов. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1980. – 192 с.
58. Волков Д.П., Крикун В. Я. Строительные машины: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: АСВ, 2002. – 375 с.
59. Волков Д.П., Крикун В. Я., Тотолин, П. Е. и др. Машины для земляных работ.– М.: Машиностроение, 1992.– 448 с.
60. Воронцова М.И. Исследование процессов взаимодействия отвала автогрейдера с грунтом: Дис. ... канд. техн.наук.- Омск: СибАДИ, 1980. -141 с.
61. Воскресенский Г.Г., Вербицкий Г.М. Моделирование движения автогрейдера по кривой / Ученые заметки ТОГУ. – 2018. – Т. 9. – № 2. – С. 690-698.
62. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 1964. – 872 с.
63. Галдин Н.С. Элементы объемных гидроприводов мобильных машин. Справочные материалы: Учебное пособие. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2005. – 127 с.
64. Галицков, С. Я. Анализ причин появления ошибок при высотном позиционировании отвала автогрейдера системой автоматического управления на базе приемника глобальной навигационной спутниковой системы / С. Я. Галицков, А. С. Лукьянов, А. С. Фадеев // Механизация и автоматизация строительства : Сборник статей / Под редакцией С.Я. Галицкого, М.В. Шувалова, Т.Е. Гордеевой, Н.Г. Чумаченко, А.К. Стрелкова. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2019. – С. 119-127.
65. Гидравлические машины, гидропривод мобильных машин: Учеб. пособие / Т. В. Алексеева, Н. С. Галдин, Э. Б. Шерман, Б. П. Воловиков. – Омск: ОмПИ, 1987. – 88 с.
66. Гинцбург Л.Л. Модель водителя для исследования движения автомобиля по заданной траектории // Автомобильная промышленность. 1997. № 8. С. 11 - 16.

67. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. - М.: Радиотехника, 2010. - 800 с. ISBN 978-5-88070-251-0

68. Глухов П.Б. Определение ориентации объекта по одномоментным измерениям в СРНС : Автореферат дис... канд. техн. наук. – Москва, 2008. – 18 с.

69. Гольчанский М.А. Повышение эффективности профилировщика ДС-151 путем совершенствования системы управления рабочим органом. Дис. ... канд.техн.наук. – Омск: СибАДИ, 1985. – 187 с.

70. Гольштейн В.М. Экспериментально-теоретическое исследование динамики автогрейдера при профилировочных работах: Дис. ... канд. техн. наук. - М., 1960. - 130 с.

71. Горбов, И.А. Планирование траектории движения транспортного средства при обходе препятствия / И. А. Горбов, А. В. Леонард // XXVIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2016) : сборник трудов конференции, Москва, 07–09 декабря 2016 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2017. – С. 236-239.

72. Гордеев В.Н. Статистическое исследование возмущающих воздействий от неровностей пути на движущееся транспортное средство. Дис. ... канд.техн.наук. -Днепропетровск, 1973. -126 с.

73. Горячкин В.П. Собрание сочинений, т. II. – М.: Колос, 1968. – 276 с.

74. ГОСТ 11. 004-74. Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения. Введ. 01.07.75. – М.: Изд- во стандартов, 1974. – 20 с.

75. ГОСТ 11030-93. Автогрейдеры. Общие технические условия. - Введ. 1995-01-01. Издательство стандартов, 1995. 25 с.

76. ГОСТ 27254-87 (ИСО 5010-84). Машины землеройные. Системы рулевого управления колесных машин. - Введ. 1988-01-01. Издательство стандартов, 1987. 21 с.

77. ГОСТ 27257-87 (ИСО 7457-83). Машины землеройные. Методы определения параметров поворота колесных машин. - Введ. 1988-01-01. М.: Издательство стандартов, 1987. 10 с. : ил.

78. ГОСТ 27535-87 (ИСО 7134-85) Машины землеройные. Автогрейдеры. Термины, определения и техническая характеристика для коммерческой документации. Введ. 1989-01-01. М.: Издательство стандартов, 1988. 14 с.

79. ГОСТ Р 52928-2008 Система спутниковая навигационная глобальная. Термины и определения. Москва: Стандартинформ, 2008. - 11 с.

80. Дегтярев В.С. Исследование процесса управления рабочим органом автогрейдера на отделочных планировочных операциях с целью его автоматизации. - Дис. ... канд.техн.наук. – М.:МАДИ, 1963. - 135 с.

81. Дегтярев В.С. Основы автоматизации землеройных машин. – М.: Высш. школа, 1969. – 91 с.

82. Денисов В.П. Оптимизация тяговых режимов землеройно-транспортных машин: дис..докт. техн. наук: 05.05.04 / Денисов Владимир Петрович. Омск: СибАДИ, 2006. – 261 с.

83. Дерюшев В.В., Косенко Е.Е., Косенко В.В. Оценка параметров безопасности автогрейдера при маневрировании в улично-дорожной сети / Безопасность техногенных и природных систем. – 2020. – № 3. – С. 33-38. – DOI 10.23947/2541-9129-2020-3-33-38.

84. Домбровский Н.Г., Гальперин М.И. Землеройно-транспортные машины. – М.: Машиностроение, 1965.- 276 с.

85. Дорожно-строительные машины и комплексы / Под ред. В. И. Баловнева. – М.: Машиностроение. – 1988.– 384 с.

86. Дорожно-строительные машины и комплексы: Учеб. для вузов/ В. И. Баловнев, Г. В. Кустарев, Е. С. Локшин и др.; МАДИ (ТУ), СибАДИ. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. – Омск: СибАДИ, 2001. – 526 с.

87. Дорожные машины. Ч. 1. Машины для земляных работ/ Т. В. Алексеева, К. А. Артемьев, А. А. Бромберг и др.– 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 504 с.

88. Дронова И.Ф., Каун Д.М. К исследованию статистических свойств микропрофилей полей, типичных для работ гусеничных тракторов // Механизация и электрификация сельскохозяйственного производства. -1968. -№11. -С.7-9.

89. Ершов В.И., Барахтанов Л.В. Вероятностные характеристики микропрофиля пересеченной местности // Изв. Вузов. Машиностроение. - 1971. - № 4. -С.21-25.

90. Жилейкин М.М. Теоретические основы повышения показателей устойчивости и управляемости колесных машин на базе методов нечеткой логики / М.М. Жилейкин. – Москва : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)", 2015. – 240 с. – ISBN 978-5-7038-4278-2.

91. Жилейкин, М. М. Алгоритм работы автоматизированной системы управления движением трактора на склоне путем коррекции углов поворота управляемых колес / М. М. Жилейкин, Е. В. Ягубова // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 6(687). – С. 43-50. – DOI 10.18698/0536-1044-2017-6-43-50.

92. Жилейкин, М. М. Моделирование систем транспортных средств : учебник / М. М. Жилейкин, Г. О. Котиев. – Москва : Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2020. – 240 с. – ISBN 978-5-7038-5351-1.

93. Жилейкин, М. М. Повышение быстроходности многоосных колесных машин путем адаптивного управления упруго-демпфирующими элементами системы подрессоривания : специальность 05.05.03 "Колесные и гусеничные машины" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Жилейкин Михаил Михайлович. – Москва, 2012. – 280 с.

94. Заболоцкий Ф.Д. Автогрейдер. 2-е изд. М.: Транспорт, 1970. 182 с.

95. Завьялов А.М. Основы теории взаимодействия рабочих органов дорожно-строительных машин с грунтом// Монография. Деп. в объединении МАШМИР 22.02.92. №6- сд92- 87 с.

96. Завьялов А.М. Основы теории взаимодействия рабочих органов дорожно-строительных машин со средой: Дис... д-ра. техн. наук. – Омск: СибАДИ, 1999. – 252 с.
97. Закин Я.Х. Маневренность движения автомобиля и автопоезда. М.: Транспорт, 1986. 136 с.
98. Закин Я.Х. Прикладная теория движения автопоезда. М.: Транспорт, 1967. 252 с.
99. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. – М.: Машиностроение, 1975.– 424 с.
100. Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Машиностроение, 1975. – 424 с.
101. Интеллектуальные системы автоматического управления/ Под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.
102. Калоев А.В. Основы проектирования систем автоматического вождения самоходных машин. - М.: Машиностроение, 1978. - 152 с.
103. Калоев А.В. Разработка научных основ автоматического вождения машинно-тракторных агрегатов в гоне при возделывании сельскохозяйственных культур : дис.. докт. техн. наук: 05.20.01, 05.13.07 / Калоев Александр Владимирович. Орджоникидзе, 1979. 443 с.
104. Калугин В.Е. Повышение эффективности автогрейдера совершенствованием устройства подвеса рабочего органа: Дис. ... канд. техн. наук. – Омск.: СибАДИ, 1985. – 247 с.
105. Карасев Г.Н., Зубков В.Ш. и др. Определение количества проходов при планировании земляного полотна автогрейдером // Повышение эффективности рабочих органов и агрегатов дорожно-строительных машин. – М.: МАДИ, 1984.- с. 66-70
106. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. – М.: Наука, 1970. – 104 с.
107. Керов И.П., Баловнев В.И., Зеленин А.Н. Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1975. 422 с.

108. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. 2-е изд. Т. 2. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 440 с.

109. Княжев Ю.М. Теоретические основы методов управления оптимальными режимами рабочих процессов землеройно-транспортных машин: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. - Омск: СибАДИ, 1996. - 42 с.

110. Колякин В.И. Совершенствование планировочных машин на базе промышленных тракторов с целью повышения точности разработки грунта: Дис. ... канд. техн. наук. - Омск, СибАДИ, 1991. - 249 с.

111. Коновалов В.Ф. Устойчивость и управляемость машино-тракторных агрегатов. Пермь: Перм. с.-х. ин-т., 1969. 444 с.

112. Кононыхин Б.Д. Автоматизация землеройных процессов в дорожном строительстве: идентификация, автокоординирование, управление: Дис. ... докт. техн. наук. - М., ВЗИСИ, 1989. - 428 с.

113. Кононыхин Б.Д. Динамические модели режимов нагружения землеройно-транспортных машин // Механизация строительства. – 2005. – № 4.

114. Кононыхин Б.Д. Инвариантное управление строительными и дорожными машинами // Строительные и дорожные машины. -1993, -№4. -С.21-24.

115. Кононыхин Б.Д. Исследование и разработка лазерной системы стабилизации рабочего органа автогрейдера: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1972. – 205 с.

116. Кононыхин Б.Д. Лазерные системы управления машинами дорожного строительства.– М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.

117. Коробочкин Б.Л. Динамика гидравлических систем станков. – М.: Машиностроение, 1976. – 240 с.

118. Корчагин П.А. Развитие научных основ проектирования виброзащитных систем землеройных машин : специальность 05.05.04 "Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины" : диссертация на соискание ученой степени

доктора технических наук / Корчагин Павел Александрович. – Омск, 2011. – 333 с.

119. Корытов М.С. Способ определения координат дорожных и строительных машин на поверхности земли на основе расстояний до трех спутников / М. С. Корытов, В. С. Щербаков, Р. Ю. Сухарев // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2016. – № 5(51). – С. 18-24.

120. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». - 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1989. - 416 с

121. Кузик В.Л. Совершенствование системы управления рабочим органом автогрейдера. – Омск: СибАДИ. – 1986. – 221 с.

122. Кузин Э.Н. и др. Статистические характеристики профилей трасс движения мелиоративных машин и их практическое использование // Гидропривод и системы управления строительных, тяговых и дорожных машин. – Омск: СибАДИ, 1980. – С. 147-154.

123. Кузин Э.Н. Основные направления развития строительных и дорожных машин // Проблемы повышения технического уровня строительных и дорожных машин, № 108, 1987.

124. Кузин Э.Н. Перспективы развития строительных и дорожных машин // Строительные и дорожные машины. – 1985. -№2. – с. 10-11.

125. Кузин Э.Н. Повышение эффективности землеройных машин непрерывного действия на основе увеличения точности позиционирования рабочего органа: Дис. ... докт. техн. наук. – М.: ВНИИСДМ, 1984. – 443 с.

126. Кузин Э.Н., Шейнис Е.И., Иванов О.И. Оценка планировочных машин на стадии испытаний // Строительные и дорожные машины. 1984. № 12. С. 12-13.

127. Кузнецова В.Н. Оптимизация формы рабочих органов землеройных машин : монография / В.Н. Кузнецова, А.М. Завьялов ; Сибирская гос. автомобильно-дорожная акад. (СибАДИ). – Омск : Наука, 2008. – ISBN 978-5-98806-081-9.

128. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. СПб: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. 512 с.

129. Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю.Ф. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 352 с.

130. Лещинский А.В. Комплексная механизация строительства : учеб. пособие для вузов / А. В. Лещинский, Г. М. Вербицкий, Е. А. Шишкин. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 231 с. — (Серия : Университеты России).

131. Математические основы теории автоматического регулирования, Под.ред. Б.К. Чемоданова. Учеб. пособие для втузов. М.: Высшая школа, 1971. — 808 с.

132. Матяш И.И. Повышение производительности автогрейдера при перемещении грунта: Дис... канд. техн. наук. — Омск: СибАДИ, 2001. — 158 с.

133. Машины для земляных работ. Учебник / Под общей ред. Ветрова Ю.А. — Киев: Вища школа, 1976. — 368 с.

134. Машины для земляных работ: Учебник/ Н. Г. Гаркави, В. И. Аринченков, В. В. Карпов и др. — М.: Высш. школа, 1982. — 335 с.

135. Мельников А.А. Управление техническими объектами автомобилей и тракторов: Системы электроники и автоматики: Учеб. пособие для студ. вузов.— М.: Издательский центр «Академия», 2003. — 376 с.

136. Мещеряков В.А. Адаптивное управление рабочими процессами землеройно-транспортных машин. Дис. ... докт.техн.наук. — Омск: СибАДИ, 2008. — 303 с.

137. Мещеряков В.А. Нейросетевое адаптивное управление тяговыми режимами землеройно-транспортных машин: Монография. — Омск: ОмГТУ, 2007. — 219 с.

138. Мещеряков В.А. Повышение точности управления рабочим органом автогрейдера на профилировочных работах: Автореф... дис. канд. техн. наук. — Омск, СибАДИ, 1999. — 20 с.

139. Налимов В.В. Теория эксперимента. - М.: Наука, 1971. - 260 с.
140. Нарбут А.Н. Теория автомобиля [Текст]: Учебное пособие. Ч. 2. М.: МАДИ (ТУ), 2001. 36 с.
141. Нгуен Т.З. Построение траектории движения мобильного робота в зданиях и сооружениях / Т. З. Нгуен, И. А. Щербатов, О. М. Проталинский // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2016. – № 1(83). – С. 79-81.
142. Недорезов И.А. и др. Вероятностный анализ усилий в рабочем оборудовании землеройных машин// Строительные и дорожные машины. – 1971. – № 8. – С. 10–12.
143. Недорезов И.А. Исследование копания грунта отвалом автогрейдера: Дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1958.– 195 с.
144. Недорезов И.А., Машкович О. Н., Спивак С.Г. Машины и механизмы транспортного строительства. – М.: Машиностроение, 1989.
145. Немировский Э.Э. Основы аналитических методов определения планирующих свойств машин типа грейдер: Дис. ... канд. техн. наук. – М.:МАДИ, 1964. – 315 с.
146. Палеев В.А. Исследование автогрейдера с целью повышения точности профилировочных работ: Дис. ... канд. техн.наук. – Омск: СибАДИ, 1980. – 231 с.
147. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – 2-е изд., исправл. – М.: Высш. шк., 2005. – 544 с.
148. Пат. 133541 Российская Федерация, МПК E02F3/76 Автогрейдер [Текст] / Щербаков В.С., Жданов А.В. , Портнова А.А. ;заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "СибАДИ". - №2013121216/03; заявл. 07.05.2013; опубл. 20.10.2013.
149. Пат. 149425 Российская Федерация, МПК B62D5/28. Рулевое управление автогрейдером [Текст] / Щербаков В.С., Портнова А.А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "СибАДИ". - №2014136635/11; заявл. 09.09.2014; опубл. 10.01.2015.

150. Пат. 149803 Российская Федерация, МПК E02F3/76. Автогрейдер [Текст] / Щербаков В.С., Портнова А.А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "СибАДИ". - №2014120272/03; заявл. 20.05.2014; опубл. 20.01.2015.

151. Пат. Система рулевого управления автогрейдером: пат. Рос. Федерация/ Ионова Ю.Е., Щербаков В.С. – № 174238; заявл. 29.05.2017; опубл. 09.10.2017. Бюл. № 28. - 4 с.

152. Перевертун П.Г. Исследование профиля пути движения автомобильных сельскохозяйственных агрегатов // Доклады ВАСХНИЛ. 1964. Вып. 7. -40 с.

153. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа, 1989.- 367 с.

154. Пиковская А.Н. Исследование автономной системы автоматического управления автогрейдером при продольной планировке: Дис. ... канд. техн. наук. - М., 1972. - 126 с.

155. Повышение эффективности автоматических систем вождения машино-тракторным агрегатом / А. В. Линенко, Р. Р. Галиуллин, А. И. Азнагулов, В. В. Лукьянов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 6(80). – С. 151-153.

156. Поддубный В.И. Повышение эффективности использования колесных мобильных машин в АПК на основе улучшения их устойчивости и управляемости : Дис... д-ра техн. наук. – Барнаул, 2011. – 422 с.

157. Подиновский В.В., Гаврилов В.М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. – М.: Сов. радио, 1975. – 192 с.

158. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора. – М.: Наука, 1976. –104 с.

159. Пономарев В.В. Статистический анализ рельефа чека при планировки посуху и по воде // Мелиорация и сельскохозяйственное строительство на Дальнем Востоке. -Уссурийск. 1987. -С.149-155.

160. Попов Д.Н. Механика гидро- и пневмоприводов: Учеб. для вузов. М.: МГУТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 320 с.

161. Попова Е.В. Исследования технологий производства планировочных работ в верхних слоях земляного полотна с целью повышения их качества путем использования автоматизированных автогрейдеров: Дис. ... канд. техн. наук. – М.:МАДИ, 1980. – 166 с.

162. Портнова А.А. Зависимость между углами поворота передних управляемых колес и шарнирно-сочлененной рамы автогрейдера // Омский научный вестник. декабрь 2013. № 3 (123). С. 157 - 159.

163. Портнова А.А., Котькин С.В. Вывод аналитической зависимости радиуса поворота от угла поворота передних управляемых колес автогрейдера / Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации. – Омск: СибАДИ, 2016. – С. 472-476.

164. Портнова А.А., Щербаков В.С., Котькин С.В. Результаты теоретических исследований математической модели автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой // Омский научный вестник. июль 2014. № 2 (130). С. 118 - 121.

165. Прямые оценки качества реакции движения автомобиля на ступенчатое управляющее воздействие / У.Ш. Вахидов, Ю.И. Молев, М.Г. Черевастов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. - № 3(122). – С. 111-120. – DOI 10.46960/1816-210X_2018_3_111.

166. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ/ Под ред. Е. Ю. Малиновского. – М.: Машиностроение, 1980.– 216 с.

167. Ронинсон Э.Г. Автогрейдеры. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986.– 222 с.

168. Рославцев А.В. Теория движения тягово-транспортных средств. – М.: УМЦ Триада, 2003.

169. Росляков В.П. Динамика колесных машинотракторных агрегатов при случайных возмущениях (колебания и и устойчивость): Дис. ... д-ра. техн. наук. – Курск, 1969.- 428 с.

170. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022612332 Российская Федерация. Модуль генерации трехмерного микрорельефа для теоретических исследований дорожно-строительных машин. №

2022612332 : заявл. 07.02.2022 : опубл. 10.02.2022 / Р. Ю. Сухарев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)».

171. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022612332 Российская Федерация. Модуль определения координат дорожно-строительной машины на поверхности земли на основе расстояний до трех спутников. № 2022612587 : заявл. 25.04.2022 : опубл. 28.04.2022 / Р. Ю. Сухарев, М. С. Корытов, В. С. Щербаков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)».

172. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022612332 Российская Федерация. Модуль построения траектории движения дорожно-строительной машины. № 2022612332 : заявл. 07.02.2022 : опубл. 10.02.2022 / Р. Ю. Сухарев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)».

173. Севров К.П., Горячко Б. В., Покровский, А. А. Автогрейдеры. Конструкция, теория, расчет.– М.: Машиностроение, 1970.– 192 с.

174. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

175. Сетевые спутниковые радионавигационные системы/ В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др.: Под ред. В.С. Шебшаевича. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1993. - 408 с. ISBN 5-256-00174-4

176. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. – Киев: техника, 1975, - 768 с.

177. Силаев А.А. Спектральная теория подрессоривания транспортных машин. -М.:Машиностроение, 1972. -192 с.

178. Силуков Ю.Д., Плужников Н.И. Статистические характеристики микропрофиля лесовозных дорог // Автомобильная промышленность. -1973. -№5. -С.28-30.

179. Синякин А.К. Физические принципы работы GPS/ГЛОНАСС: монография / А.К. Синякин, А.В. Кошелев. - Новосибирск: СГГА, 2009. - 110 с.

180. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин: Учеб. для студентов машиностроит. спец. вузов. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.

181. СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги (Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85).

182. СП 42.13330.2011 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*. - Введ 2011-05-20. М.: ОАО "ЦПП", 2011. 114 с.

183. СП 78.13330.2012 Автомобильные дороги (Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85).

184. Ставских И.А. Повышение точности планировочных работ выполняемых бульдозерным агрегатом, путем совершенствования его системы управления: Дис. ... канд. техн. наук. – Омск: СибАДИ, 1989. – 178 с.

185. Степанов Э.А. Исследование длины базы и места расположения рабочего органа планировочных машин: Дис. ... канд. техн. наук. - М., 1955. - 126 с.

186. Строительные машины: Справочник: В 2 т. Т. 1: Машины для строительства промышленных, гражданских сооружений и дорог/ А. В. Раннев, В. Ф. Корелин, А. В. Жаворонков и др.; Под общ. ред. Э. Н. Кузина. – 5-е изд., перераб.– М.: Машиностроение, 1991.– 496 с.

187. Судник Ю. А., Петков Д. И., Витков В. Т. Автоматизированные системы мобильных агрегатов// Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1997. – № 2. – С. 19–22.

188. Сухарев Р. Ю. Анализ систем управления дорожно-строительных машин и направления дальнейшего развития / Р. Ю. Сухарев // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : Сборник материалов V Национальной научно-

практической конференции, Омск, 28 апреля – 29 2022 года. – Омск: СибАДИ, 2022. – С. 98-104.

189. Сухарев Р.Ю. Адаптация метода "Стэнли (Stanley) для управления беспилотной дорожно-строительной машиной / Р.Ю. Сухарев, П.А. Корчагин // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 6. – С. 7-13.

190. Сухарев Р.Ю. Интегральные критерии оценки качества земляных работ, выполняемых цепными траншейными экскаваторами / Р.Ю. Сухарев, С.В. Сухарева // Управление качеством образования, продукции и окружающей среды : Материалы 9-й Всероссийской научно-практической конференции, Бийск, 13–14 ноября 2015 года / Под редакцией А.Г. Овчаренко. – Бийск: ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), 2015. – С. 135-138.

191. Сухарев Р.Ю. Математические модели процессов поворота колесных дорожно-строительных машин / Р.Ю. Сухарев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2021. – № 3. – С. 259-269. – DOI 10.22281/2413-9920-2021-07-03-259-269.

192. Сухарев Р.Ю. Методы управления курсом движения беспилотного автогрейдера / Р.Ю. Сухарев // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19. – № 1(83). – С. 48-60. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-1-48-60.

193. Сухарев Р.Ю. Моделирование трехмерного микрорельефа для теоретических исследований дорожных и строительных машин / Р. Ю. Сухарев // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2014. – № 6(40). – С. 108-111.

194. Сухарев Р.Ю. Особенности кинематики поворота автогрейдера с шарнирно-сочленённой рамой / Р.Ю. Сухарев, П.А. Корчагин // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 7. – С. 3-7.

195. Сухарев Р.Ю. Перспективы создания систем автономного управления дорожно-строительных машин / Р.Ю. Сухарев // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 2. – С. 3-10.

196. Сухарев Р.Ю. Применение метода «чистое преследование» (Pure Pursuit) для управления беспилотным автогрейдером / Р.Ю. Сухарев // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т.20. – № 2(84). – С. 156-169. DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-2-156-169.

197. Сухарев Р.Ю. Принципы управления беспилотной дорожно-строительной машиной / Р.Ю. Сухарев, П.А. Корчагин // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 9. – С. 27-32.

198. Сухарев Р.Ю. Система автоматизации проектирования устройства управления гидрообъемной трансмиссией цепного траншейного экскаватора: монография / Р.Ю. Сухарев, М.В. Суковин. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2014. – 120 с. – ISBN 978-5-93204-609-8.

199. Сухарев Р.Ю. Совершенствование гидравлического рулевого механизма автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой: монография / Р.Ю. Сухарев, В.С. Щербаков, Ю.Е. Ионова. – Омск: СибАДИ, 2020. ISBN 978-5-00113-158-8.

200. Сухарев Р.Ю. Совершенствование рабочего оборудования крана-трубоукладчика с целью снижения неуправляемых колебаний перемещаемого груза: монография / Р.Ю. Сухарев, В.С. Щербаков, В.В. Танский. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. – 157 с. – ISBN 978-5-00113-140-3.

201. Сухарев Р.Ю. Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора : специальность 05.05.04 "Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Омск, 2008. – 187 с.

202. Сухарева С.В. Обоснование интегральных критериев качества земляных работ, выполненных цепными траншейными экскаваторами / С.В. Сухарева, Р.Ю. Сухарев // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2015. – № 5(45). – С. 52-55.

203. Тарасов В.Н. Динамика систем управления рабочими процессами землеройно-транспортных машин. – Омск: Зап.-сиб. кн. изд-во, 1975. – 182 с.

204. Тарасов В.Н. Основы оптимизации рабочих процессов землеройно-транспортных машин. – Автореф. Дис...докт.техн.наук. – Киев, 1981. – 34с.
205. Титенко В. В. Повышение производительности автогрейдера, выполняющего планировочные работы, совершенствованием системы управления: Дис. ... канд. техн. наук. – Омск, СибАДИ, 1997. – 172 с.
206. Трояновская И.П. Анализ развития теории поворота колесных машин // Вестник машиностроения. 2010. № 1. С. 92-96.
207. Трояновская И.П. Анализ теории поворота тракторных агрегатов // Строительные и дорожные машины. 2009. № 7. С. 42-47.
208. Трояновская И.П. Взаимодействие колесного движителя с грунтом на повороте с точки зрения механики // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 3. С. 29-35.
209. Трояновская И.П. Методология моделирования криволинейного движения тракторных агрегатов : специальность 05.05.03 "Колесные и гусеничные машины" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Трояновская Ирина Павловна. – Челябинск, 2011. – 326 с.
210. Тяпкин В.И. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография / В.Н. Тяпкин, Е.Н. Гарин. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. - 260 с. ISBN 978-5-7638-2639-5
211. Ульянов Н.А. Колесные движители строительных и дорожных машин. Теория и расчет. – М.: Машиностроение, 1982. – 279 с.
212. Ульянов Н.А. Основы теории и расчета колесного движителя землеройных машин. – М.: Машгиз, 1962. – 208 с.
213. Ульянов Н.А. Теория самоходных колесных землеройно-транспортных машин. – М.: Машиностроение, 1969. – 520 с.
214. Управление рабочим процессом землеройно-транспортных машин / В. Ф. Амельченко; СибАДИ. – Омск: Зап.- Сиб. кн. изд-во, 1975. – 232 с.
215. Фаробин Я.Е. Теория поворота транспортных машин. М.: Машиностроение, 1970. 176 с.

216. Федоров Д.И. Рабочие органы землеройных машин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.
217. Федоров Д.И., Бондарович Б.А. Надежность рабочего оборудования землеройных машин. – М.: Машиностроение. 1981. – 280 с.
218. Формирование закона управления углом поворота рулевого колеса для поддержания заданной траектории движения автомобиля / И. В. Чичекин, Я. Ю. Левенков, П. И. Зуенков, Р. О. Максимов // Труды НАМИ. – 2019. – № 3(278). – С. 53-61.
219. Фрейнкман И.Е., Ильгисонис В.К. Землеройные машины. – Л.: Машиностроение, 1972. – 320 с.
220. Холодов А.М. Основы динамики землеройно-транспортных машин. – М.: Машиностроение, 1968. – 323 с.
221. Холодов А.М., Ничке В. В., Назаров Л. В. Землеройно-транспортные машины. – Харьков: Вища школа, 1982. – 192 с.
222. Холодов А.М., Руднев В. К. и др. Проектирование машин для земляных работ/ Под ред. А.М. Холодова. – Харьков: Вища школа, 1986. – 272 с.
223. Ченцов В.Н. Исследование следящей системы на автогрейдер: Дис. ... канд. техн. Наук. - Л.: ЛКВВИА ,1962.-146 с.
224. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений/ Под общ. ред. В. Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.
225. Шардакова Ю.А., Вахрушев С.И. Исследование гидравлического рулевого управления автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой / Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2020. – Т. 2. – С. 399-404.
226. Шестопалов К.К. Выбор и обоснование параметров автогрейдера: Дис. ... канд. техн. наук. - М.: МАДИ , 1979.- 212 с.
227. Щербаков В.С. Система автоматизации проектирования основных геометрических параметров траков гусеничной ленты цепного траншейного экскаватора : монография / В. С. Щербаков, Р. Ю. Сухарев, С. Д. Игнатов. – Омск: СибАДИ, 2014. – 144 с. – ISBN 978-5-93204-682-1.

228. Щербаков В.С. Влияние положения рабочего органа в базе землеройно-транспортной машины на процесс заглабления / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, Р.Ю. Сухарев // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2017. – № 4(47). – С. 73-80.

229. Щербаков В.С. Научные основы повышения точности работ, выполняемых землеройно-транспортными машинами: Дис... д-ра техн. наук. – Омск: СибАДИ, 2000. – 416 с.

230. Щербаков В.С. Развитие теории оптимального управления дорожными и строительными машинами на основе систем спутниковой навигации : монография / В.С. Щербаков, Р.Ю. Сухарев, М.С. Корытов. – Омск : Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ), 2017. – 155 с. – ISBN 978-5-93204-929-7.

231. Щербаков В.С. Совершенствование рулевого управления автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой : монография / В.С. Щербаков, А.А. Портнова, Р.Ю. Сухарев. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2016. – 157 с. – ISBN 978-5-93204-971-6.

232. Щербаков В.С. Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора : монография / В.С. Щербаков, Р.Ю. Сухарев. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2011. – 149 с. – ISBN 978-5-93204-598-5.

233. Щербаков В.С., Беляев Н.В., Беляев В.В. Система автоматизации эскизного проектирования автогрейдера: Монография. Омск: СибАДИ, 2009. 139 с.

234. Щербаков В.С., Бирюков С.Т. Устройство контроля заданного курса движения дорожно- строительной машины // А.с. 1240838А1 (СССР).- Оpubл. в Б.И., 1986, №24.

235. Щербаков В.С., Бирюков С.Т., Гольчанский М.А., Попов А.М., Ерошенков В.Г., Шалимов П.Ю. Устройство контроля положения рабочего органа и курса движения дорожно- строительной машины // А.с. 1148949 (СССР).- Оpubл. в Б.И., 1985, №13.

236. Щербаков В.С., Дерюженко С.А., Гольчанский М.А. Система автоматического управления курсом строительно-дорожной машины // А.с. 1488407 (СССР). -Опубл. в Б.И., 1989, №23

237. Щербаков В.С., Дерюженко С.А., Зимин Е.А. Устройство автоматического управления движением землеройно- транспортной машины по заданному курсу // А.с. 1550053 (СССР).- Опубл. в Б.И., 1990, №10.

238. Щербаков В.С., Жегалов В.В., Кугель А.Я., Ерошенков В.Г., Колмогорцев Б.С., Дерюженко С.А., Бирюков С.Т. Система управления движением по курсу двухгусеничной машины // А.с. 1379145 (СССР). -Опубл. в Б.И., 1989, №9

239. Щербаков В.С., Кугель А.Я., Дерюженко С.А., Романов А.М., Гольчанский М.А., Митасов В.И. Система автоматического управления курсом движения колесной землеройно-транспортной машины // А.с. 1514882 (СССР). - Опубл. в Б.И.

240. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 560 с.

241. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М: Горячая линия-Телеком, 2005. - 272 с. ISBN 5-93517-218-6.

242. <http://www.bnti.ru/dbtexts/ipks/alex1/gps/gpsprnc/gpsprin.htm>

243. <https://belgidrosila.ru/sistemy-nivelirovaniya/>

244. <https://habr.com/ru/post/111538/>

245. <https://leica-geosystems.com/>

246. https://ru.wikipedia.org/wiki/Строительно-дорожные_машины

247. <https://topcon.pro/>

248. <https://www.intelrealsense.com/>

249. <https://www.livoxtech.com/>

250. <https://www.nvidia.com/>

251. <https://www.st.com/>

252. <https://www.trimble.com/>

ПРИЛОЖЕНИЯ

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022612332

**Модуль генерации трехмерного микрорельефа для
теоретических исследований дорожно-строительных
машин**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Сибирский государственный автомобильно-дорожный
университет (СибАДИ)" (RU)*

Автор(ы): *Сухарев Роман Юрьевич (RU)*



Заявка № 2022611482

Дата поступления 07 февраля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 февраля 2022 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат № 7569F8E0C01A41E78545E0B1D9F81A65C01
Владелец **Ивлиев Григорий Петрович**
Действителен с 24.12.2021 по 24.12.2022

Г. П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022612587

Модуль построения траектории движения дорожно-строительной машины

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)" (RU)*

Автор(ы): *Сухарев Роман Юрьевич (RU)*

Заявка № 2022612212

Дата поступления 17 февраля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 февраля 2022 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 69b80077e14e490ca94e6bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022618207

Модуль определения координат дорожно-строительной машины на поверхности земли на основе расстояний до трех спутников

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)" (RU)*

Авторы: *Сухарев Роман Юрьевич (RU), Корытов Михаил Сергеевич (RU), Щербаков Виталий Сергеевич (RU)*

Заявка № 2022617100

Дата поступления 22 апреля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 05 мая 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 68b8007761 4-4010a24edba24145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

Акты внедрения результатов исследований

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального
директора по науке
С.В. Кривальцевич
05 2022 г.

**АКТ**

внедрения результатов диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук Сухарева Романа Юрьевича

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук Сухарева Романа Юрьевича приняты к внедрению в АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» при разработке технических заданий и технических обоснований, в виде математических моделей, алгоритмов, структурной схемы, инженерной методики и варианта реализации для создания перспективных систем автономного управления землеройно-транспортных машин и дорожно-строительной техники.

Разработанные алгоритмы дают возможность планировать траектории движения землеройно-транспортных машин и дорожно-строительной техники и осуществлять движение машины по построенной траектории без участия человека-оператора.

Применение предложенной инженерной методики и структурной схемы перспективной системы автономного управления дают возможность создания принципиально новых систем автономного управления землеройно-транспортных машин и дорожно-строительной техники и существенно повысить эффективность такой техники при строительстве и ремонте дорог и других сооружений

Начальник отдела развития
производства продукции
гражданского назначения



Н.П. Пахомов

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «СибАДИ»В.Н. Кузнецова
« 12 » 04 2022 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Сухарева Р.Ю. по теме
«Научные основы автономного управления колесными дорожно-
строительными машинами» в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается внедрение в учебный процесс, осуществляемый в федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» на кафедре «Автоматизация производственных процессов и электротехника» результатов диссертационной работы Сухарева Р.Ю. в качестве разделов курсов лекций дисциплин «Автоматизация и компьютеризация транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования» «Автоматизация транспортно-технологических машин», «Системы автоматики подъемно-транспортных, строительно-дорожных машин», «Эксплуатация систем управления машин и комплексов», «Эксплуатация систем управления транспортно-технологических машин и оборудования», «Электрооборудование и электронные системы управления транспортно-технологических машин».

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», 23.04.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы»

Зав. кафедрой «Автоматизация
производственных процессов и
электротехника»
к.т.н., доцент

С.А. Милошенко

Листинги программ

1. Модуль построения траектории

```

Rmin=25;           %минимальный радиус поворота
xAi=53;           %координата X точки Ai
yAi=50;           %м
fiAi=100;         %азимут точки Ai
xAi1=183;         %координата X точки Ai+1
yAi1=82;         %координата Y точки Ai+1
fiAi1=90;         %азимут точки Ai+1
fiAA=((xAi1-xAi)/abs(xAi1-xAi)-1)*(-90)*(yAi1-yAi)/abs(yAi1-
yAi)+rad2deg(atan((yAi1-yAi)/(xAi1-xAi)));
if fiAA>fiAi %находим координаты центра поворота Ail
    xAil=xAi-Rmin*cos(deg2rad(fiAi-90));
    yAil=yAi-Rmin*sin(deg2rad(fiAi-90));
else
    xAil=xAi+Rmin*cos(deg2rad(fiAi-90));
    yAil=yAi+Rmin*sin(deg2rad(fiAi-90));
end
if fiAA<fiAi1 %находим координаты центра поворота Aill
    xAill=xAi1-Rmin*cos(deg2rad(fiAi1-90));
    yAill=yAi1-Rmin*sin(deg2rad(fiAi1-90));
else
    xAill=xAi1+Rmin*cos(deg2rad(fiAi1-90));
    yAill=yAi1+Rmin*sin(deg2rad(fiAi1-90));
end
fiAA1=((xAill-xAil)/abs(xAill-xAil)-1)*(-90)*(yAill-yAil)/abs(yAill-
yAil)+rad2deg(atan((yAill-yAil)/(xAill-xAil)));
AilAill=(xAill-xAil)/cos(deg2rad(fiAA1));
tetta=rad2deg(acos(2*Rmin/AilAill));
if fiAi>fiAA %случаи а и б
    if fiAA>fiAi1 %а
        xb=xAil-Rmin*sin(deg2rad(fiAA1));
        yb=yAil+Rmin*cos(deg2rad(fiAA1));
        xc=xAill-Rmin*sin(deg2rad(fiAA1));
        yc=yAill+Rmin*cos(deg2rad(fiAA1));
    else %б
        xb=xAil+Rmin*cos(deg2rad(fiAA1+tetta));
        yb=yAil+Rmin*sin(deg2rad(fiAA1+tetta));
        xc=xAill-Rmin*cos(deg2rad(fiAA1+tetta));
        yc=yAill-Rmin*sin(deg2rad(fiAA1+tetta));
    end
else %случаи в и г
    if fiAA>fiAi1 %г
        xb=xAil+Rmin*cos(deg2rad(fiAA1-tetta));
        yb=yAil+Rmin*sin(deg2rad(fiAA1-tetta));
        xc=xAill-Rmin*cos(deg2rad(fiAA1-tetta));
        yc=yAill-Rmin*sin(deg2rad(fiAA1-tetta));
    else %в
        xb=xAil+Rmin*sin(deg2rad(fiAA1));
        yb=yAil-Rmin*cos(deg2rad(fiAA1));
    end
end

```

```

        xc=xAi11+Rmin*sin(deg2rad(fiAA1));
        yc=yAi11-Rmin*cos(deg2rad(fiAA1));
    end
end
        fiBC=(xc-xb)/abs(xc-xb)-1)*(-90)*(yc-yb)/abs(yc-
yb)+rad2deg(atan((yc-yb)/(xc-xb)));

if fiAA<fiAi
    fil=fiAi+90;
    fill=fiBC+90;
else
    fil=fiAi-90;
    fill=fiBC-90;
end
k=(yc-yb)/(xc-xb);
b=(xc*yb-xb*yc)/(xc-xb);
traj(1:31,1:2)=0; %заполнение опорных точек
traj(1,1)=xAi;
traj(1,2)=yAi;
traj(11,1)=xb;
traj(11,2)=yb;
traj(21,1)=xc;
traj(21,2)=yc;
traj(31,1)=xAi1;
traj(31,2)=yAi1;
ugol=fil;
for i=2:10 %заполнение первого участка траектории
    ugol=ugol+(fill-fil)/10;
    traj(i,1)=cos(deg2rad(ugol))*Rmin+xAi1;
    traj(i,2)=sin(deg2rad(ugol))*Rmin+yAi1;
end
for i=12:20 %заполнение второго участка траектории
    traj(i,1)=(traj(21,1)-traj(11,1))/10*(i-11)+traj(11,1);
    traj(i,2)=traj(i,1)*k+b;
end
if fiAA<fiAi1
    fill11=fiAi1-90;
else
    fill11=fiAi1+90;
end
if fiAA<fiAi
    if fiAA<fiAi1 %++
        fill=fill-180;
    else %+-
        fill=fill;
    end
else
    if fiAA<fiAi1 %--
        fill=fill+180;
    else %++
        fill=fill;
    end
end
end
end

```

```

ugol=fill;
for i=22:30 %заполнение третьего участка траектории
    ugol=ugol+(fill1-fill)/10;
    traj(i,1)=cos(deg2rad(ugol))*Rmin+xAi11;
    traj(i,2)=sin(deg2rad(ugol))*Rmin+yAi11;
end

```

2. Модуль моделирования трехмерного микрорельефа

```

n=100;           //размер генерации
m=100;          //количество итераций
clear A;        //очистка массива A
clear B;        //очистка массива B
A(1:n, 1:n)=0; //создание массива A и заполнение его нулями
for k=1:1:m     //цикл итераций
    X=round(rand(1)*n); //случайным образом находится
координата x
    Y=round(rand(1)*n); //случайным образом находится
координата y
    R=round(rand(1)*(n*0.17)); //случайным образом находится
радиус R
    for i=(X-R):1:(X+R) //цикл построения холма
        for j=(Y-R):1:(Y+R)
            D=R^2-((i-X)^2+(j-Y)^2); //формула холма
            if i>0 && i<=n && j>0 && j<=n && D>0 //проверка
нахождения точки внутри генерации и значение
больше 0
                A(i,j)=A(i,j)+D;
            end
        end
    end
end
end
minA=min(min(A));
maxA=max(max(A));
B(1:n, 1:n)=0;
for i=1:1:n //цикл нормализации
    for j=1:1:n
        B(i,j)=(A(i,j)-minA)/(maxA-minA); //формула нормализации
    end
end
surf(B);figure(gcf);

```

3. Модуль определения координат дорожно-строительной машины на поверхности земли на основе расстояний до трех спутников

```

x01=1000;
y01=2000;
z01=3000;
x02=2000;
y02=3000;
z02=4000;

```



```

x03=5000;
y03=6000;
z03=7000;
xs2=10;
xs3=100;
ys3=10;
l1=1000;
l2=1000;
l3=1000;
ls12=xs2;
p=(l1+l2+ls12)/2;
R=2/ls12*sqrt(p*(p-ls12)*(p-l1)*(p-l2));
xst=sign(l1-l2)*sqrt(l1^2-R^2);
yst=(xs3^2-2*xs3*xst+xst^2+ys3^2+R^2-l3^2)/(2*ys3);
zst=abs(sqrt(R^2-yst^2));
x012=x02-x01;
y012=y02-y01;
z012=z02-z01;
R012=[x012,y012,z012,1]';
x013=x03-x01;
y013=y03-y01;
z013=z03-z01;
R013=[x013,y013,z013,1]';
xxs=x012;
yxs=y012;
zxs=z012;
Rxs=[xxs,yxs,zxs,1]';
xzs=y012*z013-z012*y013;
yzs=z012*x013-x012*z013;
zxs=x012*y013-y012*x013;
Rzs=[xzs,yzs,zxs,1]';
xys=zxs*yzs-yxs*zxs;
yys=xxs*zxs-zxs*xzs;
zys=yxs*xzs-xxs*yzs;
Rys=[xys,yys,zys,1]';
mRxs=abs(sqrt(xxs^2+yxs^2+zxs^2));
mRys=abs(sqrt(xys^2+yys^2+zys^2));
mRzs=abs(sqrt(xzs^2+yzs^2+zxs^2));
xxsh=xxs/mRxs;
yxsh=yxs/mRxs;
zxsh=zxs/mRxs;
xysh=xys/mRys;
yysh=yys/mRys;
zysh=zys/mRys;
xzsh=xzs/mRzs;
yzsh=yzs/mRzs;
zzsh=zxs/mRzs;
Rxsh=[xxsh,yxsh,zxsh,1]';
Rysh=[xysh,yysh,zysh,1]';
Rzsh=[xzsh,yzsh,zzsh,1]';
Aso=[xxsh,xysh,xzsh,x01;yxsh,yysh,yzsh,y01;zxsh,zysh,zzsh,z01;0,0,0,1];
Aos=inv(Aso);

```

```
Rs1=Aos*R01;  
Rs2=Aos*R02;  
Rs3=Aos*R03;  
Rst1=[xst;yst;abs(zst);1]';  
Rst2=[xst;yst;-abs(zst);1]';  
Rt1=Aso*Rst1;  
Rt2=Aso*Rst2;
```

Математическая модель автогрейдера

Таблица П4.1 Преобразование локальных систем координат

Номер звена	Звено	Связанная система координат	Параметры переноса координат осей						Матрицы перехода в систему координат	
			X_i	Y_i	Z_i	γ_i	ϑ_i	φ_i	$i-1$	$O_0X_0Y_0Z_0$
1	Подмоторная рама	$O_1X_1Y_1Z_1$	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	A_1	$T_1 = A_1$
2	Правая балансирная тележка	$O_2X_2Y_2Z_2$	0	l_{2y}	0	0	q_{13}	0	A_2	$T_2 = A_1 A_2$
3	Левая балансирная тележка	$O_3X_3Y_3Z_3$	0	l_{3y}	0	0	q_{14}	0	A_3	$T_3 = A_1 A_3$
4	Хребтовая балка	$O_4X_4Y_4Z_4$	l_{4x}	0	l_{4z}	0	0	q_7	A_4	$T_4 = A_1 A_4$
5	Тяговая рама	$O_5X_5Y_5Z_5$	l_{5x}	0	l_{5z}	q_{10}	q_{11}	q_{12}	A_5	$T_5 = A_1 A_4 A_5$
6	Передний мост	$O_6X_6Y_6Z_6$	l_{6x}	0	l_{6z}	q_8	0	0	A_6	$T_6 = A_1 A_4 A_6$
7	Передние колеса	$O_7X_7Y_7Z_7$	0	l_{7y}	0	0	0	q_9	A_7	$T_7 = A_1 A_4 A_6 A_7$

Матрицы перехода:

$$A_1 = A_{11} \cdot A_{12} \cdot A_{13} \cdot A_{14} \cdot A_{15} \cdot A_{16}$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{13} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_{14} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_4 & \sin q_4 & 0 \\ 0 & -\sin q_4 & \cos q_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{15} = \begin{bmatrix} \cos q_5 & \sin q_5 & 0 & 0 \\ -\sin q_5 & \cos q_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_{16} = \begin{bmatrix} \cos q_6 & 0 & -\sin q_6 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin q_6 & 0 & \cos q_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos q_6 \cdot \cos q_5 & \sin q_5 & -\sin q_6 \cdot \cos q_5 & q_1 \\ \sin q_6 \cdot \sin q_4 - & \cos q_5 \cdot \cos q_4 & \cos q_6 \cdot \sin q_4 + & q_2 \\ -\cos q_6 \cdot \cos q_4 \sin q_5 & & +\sin q_6 \cdot \cos q_4 \sin q_5 & \\ \sin q_6 \cdot \cos q_4 + & -\cos q_5 \cdot \sin q_4 & \cos q_6 \cdot \cos q_4 - & q_3 \\ +\cos q_6 \cdot \sin q_4 \sin q_5 & & -\sin q_6 \cdot \sin q_4 \sin q_5 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$A_2 = A_{21} \cdot A_{22} \cdot A_{23} \cdot A_{24} \cdot A_{25} \cdot A_{26}$$

$$A_{21} = E; A_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_{2y} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{23} = E; A_{24} = E;$$

$$A_{25} = \begin{bmatrix} \cos q_{13} & \sin q_{13} & 0 & 0 \\ -\sin q_{13} & \cos q_{13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{26} = E;$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos q_{13} & \sin q_{13} & 0 & 0 \\ -\sin q_{13} & \cos q_{13} & 0 & l_{2y} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$A_3 = A_{31} \cdot A_{32} \cdot A_{33} \cdot A_{34} \cdot A_{35} \cdot A_{36}$$

$$A_{31} = E; A_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_{3y} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{33} = E; A_{34} = E;$$

$$A_{35} = \begin{bmatrix} \cos q_{14} & \sin q_{14} & 0 & 0 \\ -\sin q_{14} & \cos q_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{36} = E;$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos q_{14} & \sin q_{14} & 0 & 0 \\ -\sin q_{14} & \cos q_{14} & 0 & l_{3y} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$A_4 = A_{41} \cdot A_{42} \cdot A_{43} \cdot A_{44} \cdot A_{45} \cdot A_{46}$$

$$A_{41} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \boldsymbol{l}_{4x} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{42} = E; A_{43} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \boldsymbol{l}_{4z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_{44} = A_{45} = E; A_{46} = \begin{bmatrix} \cos q_7 & 0 & -\sin q_7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin q_7 & 0 & \cos q_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos q_7 & 0 & -\sin q_7 & \boldsymbol{l}_{4x} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin q_7 & 0 & \cos q_7 & \boldsymbol{l}_{4z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$A_5 = A_{51} \cdot A_{52} \cdot A_{53} \cdot A_{54} \cdot A_{55} \cdot A_{56}$$

$$A_{51} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \boldsymbol{l}_{5x} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{52} = E; A_{53} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \boldsymbol{l}_{5z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_{54} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_{10} & \sin q_{10} & 0 \\ 0 & -\sin q_{10} & \cos q_{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{55} = \begin{bmatrix} \cos q_{11} & \sin q_{11} & 0 & 0 \\ -\sin q_{11} & \cos q_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_{56} = \begin{bmatrix} \cos q_{12} & 0 & -\sin q_{12} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin q_{12} & 0 & \cos q_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos q_{12} \cdot \cos q_{11} & \sin q_{11} & -\sin q_{12} \cdot \cos q_{11} & \boldsymbol{l}_{5x} \\ \sin q_{12} \cdot \sin q_{10} - & \cos q_{11} \cdot \cos q_{10} & \cos q_{12} \cdot \sin q_{10} + & \mathbf{0} \\ -\cos q_{12} \cdot \cos q_{10} \sin q_{11} & & + \sin q_{12} \cdot \cos q_{10} \sin q_{11} & \\ \sin q_{12} \cdot \cos q_{10} + & -\cos q_{11} \cdot \sin q_{10} & \cos q_{12} \cdot \cos q_{10} - & \boldsymbol{l}_{5z} \\ + \cos q_{12} \cdot \sin q_{10} \sin q_{11} & & - \sin q_{12} \cdot \sin q_{10} \sin q_{11} & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$A_6 = A_{61} \cdot A_{62} \cdot A_{63} \cdot A_{64} \cdot A_{65} \cdot A_{66}$$

$$A_{61} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \mathbf{l}_{6x} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{62} = E; A_{63} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \mathbf{l}_{6z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_{64} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_8 & \sin q_8 & 0 \\ 0 & -\sin q_8 & \cos q_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{65} = A_{66} = E;$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \mathbf{l}_{6x} \\ 0 & \cos q_8 & \sin q_8 & 0 \\ 0 & -\sin q_8 & \cos q_8 & \mathbf{l}_{6z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$A_7 = A_{71} \cdot A_{72} \cdot A_{73} \cdot A_{74} \cdot A_{75} \cdot A_{76}$$

$$A_{71} = E; A_{72} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \mathbf{l}_{7y} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{73} = E;$$

$$A_{74} = A_{75} = E; A_{76} = \begin{bmatrix} \cos q_9 & 0 & -\sin q_9 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin q_9 & 0 & \cos q_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_7 = \begin{bmatrix} \cos q_9 & 0 & -\sin q_9 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \mathbf{l}_{7y} \\ \sin q_9 & 0 & \cos q_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрицы скорости:

$$U_{11} = E_x A_{11} A_{12} A_{13} A_{14} A_{15} A_{16}; U_{12} = A_{11} E_y A_{12} A_{13} A_{14} A_{15} A_{16};$$

$$U_{13} = A_{11} A_{12} E_z A_{13} A_{14} A_{15} A_{16}; U_{14} = A_{11} A_{12} A_{13} E_\gamma A_{14} A_{15} A_{16};$$

$$U_{15} = A_{11} A_{12} A_{13} A_{14} E_\varphi A_{15} A_{16}; U_{16} = A_{11} A_{12} A_{13} A_{14} A_{15} E_\rho A_{16};$$

$$U_{17} = U_{18} = U_{19} = U_{110} = U_{111} = U_{112} = U_{113} = U_{114} = E_0;$$

$$U_{21} = U_{11} A_2; U_{22} = U_{12} A_2; U_{23} = U_{13} A_2; U_{24} = U_{14} A_2; U_{25} = U_{15} A_2; U_{26} = U_{16} A_2;$$

$$U_{27} = U_{28} = U_{29} = U_{210} = U_{211} = U_{212} = U_{214} = E_0;$$

$$U_{213} = A_1 A_{21} A_{22} A_{23} A_{24} E_\varphi A_{25} A_{26};$$

$$\begin{aligned}
&U_{31} = U_{21}A_3; U_{32} = U_{22}A_3; U_{33} = U_{23}A_3; U_{34} = U_{24}A_3; U_{35} = U_{25}A_3; U_{36} = U_{26}A_3; \\
&U_{37} = U_{38} = U_{39} = U_{310} = U_{311} = U_{312} = U_{313} = E_0; \\
&U_{314} = A_1A_{31}A_{32}A_{33}A_{34}E_9A_{35}A_{36}; \\
&U_{41} = U_{31}A_4; U_{42} = U_{32}A_4; U_{43} = U_{33}A_4; U_{44} = U_{34}A_4; U_{45} = U_{35}A_4; U_{46} = U_{36}A_4; \\
&U_{48} = U_{49} = U_{410} = U_{411} = U_{412} = U_{413} = U_{414} = E_0; \\
&U_{47} = A_1A_{41}A_{42}A_{44}A_{45}E_\varphi A_{46}; \\
&U_{51} = U_{41}A_5; U_{52} = U_{42}A_5; U_{53} = U_{43}A_5; U_{54} = U_{44}A_5; U_{55} = U_{45}A_5; U_{56} = U_{46}A_5; \\
&U_{57} = U_{47}A_5; U_{58} = U_{59} = U_{513} = U_{514} = E_0; \\
&U_{510} = A_1A_4A_{51}A_{52}A_{53}E_\gamma A_{54}A_{55}A_{56}; U_{511} = A_1A_4A_{51}A_{52}A_{53}A_{54}E_9A_{55}A_{56}; \\
&U_{512} = A_1A_4A_{51}A_{52}A_{53}A_{54}A_{55}E_\varphi A_{56}; \\
&U_{61} = U_{51}A_6; U_{62} = U_{52}A_6; U_{63} = U_{53}A_6; U_{64} = U_{54}A_6; U_{65} = U_{55}A_6; U_{66} = U_{56}A_6; \\
&U_{67} = U_{57}A_6; U_{69} = U_{610} = U_{611} = U_{612} = U_{613} = U_{614} = E_0; \\
&U_{68} = A_1A_4A_{61}A_{62}A_{63}E_\gamma A_{64}A_{65}A_{66}; \\
&U_{71} = U_{61}A_7; U_{72} = U_{62}A_7; U_{73} = U_{63}A_7; U_{74} = U_{64}A_7; U_{75} = U_{65}A_7; U_{76} = U_{66}A_7; \\
&U_{77} = U_{67}A_7; U_{78} = U_{68}A_7; U_{710} = U_{711} = U_{712} = U_{713} = U_{714} = E_0; \\
&U_{79} = A_1A_4A_6A_{71}A_{72}A_{73}A_{74}A_{75}E_\varphi A_{76}; \\
&M_{11} = E_0; M_{12} = E_0; M_{13} = E_0; M_{14} = E_0; M_{15} = E_0; M_{16} = E_0; \\
&M_{17} = E_0; M_{18} = D_Z A_4 A_{61} A_{62} A_{63} E_\gamma A_{64} A_{65} A_{66}; M_{19} = E_0; \\
&M_{110} = E_0; M_{111} = E_0; M_{112} = E_0; M_{113} = E_0; M_{114} = E_0; \\
&M_{21} = E_0; M_{22} = E_0; M_{23} = E_0; M_{24} = E_0; M_{25} = E_0; M_{26} = E_0; \\
&M_{27} = E_0; M_{28} = D_Z A_4 A_{61} A_{62} A_{63} E_\gamma A_{64} A_{65} A_{66}; M_{29} = E_0; \\
&M_{210} = E_0; M_{211} = E_0; M_{212} = E_0; M_{213} = E_0; M_{214} = E_0; \\
&M_{31} = E_0; M_{32} = E_0; M_{33} = E_0; M_{34} = E_0; M_{35} = E_0; M_{36} = E_0; \\
&M_{37} = E_0; M_{38} = E_0; M_{39} = E_0; M_{310} = E_0; M_{311} = E_0; M_{312} = E_0; \\
&M_{313} = D_Z A_1 A_{21} A_{22} A_{23} A_{24} E_9 A_{25} A_{26}; M_{314} = E_0; \\
&M_{41} = E_0; M_{42} = E_0; M_{43} = E_0; M_{44} = E_0; M_{45} = E_0; M_{46} = E_0; \\
&M_{47} = E_0; M_{48} = E_0; M_{49} = E_0; M_{410} = E_0; M_{411} = E_0; M_{412} = E_0; \\
&M_{413} = E_0; M_{414} = D_Z A_1 A_{31} A_{32} A_{33} A_{34} E_9 A_{35} A_{36}; \\
&M_{51} = E_0; M_{52} = E_0; M_{53} = E_0; M_{54} = E_0; M_{55} = E_0; M_{56} = E_0; \\
&M_{57} = E_0; M_{58} = E_0; M_{59} = E_0; M_{510} = E_0; M_{511} = E_0; M_{512} = E_0; \\
&M_{513} = D_Z A_1 A_{21} A_{22} A_{23} A_{24} E_9 A_{25} A_{26}; M_{514} = E_0; \\
&M_{61} = E_0; M_{62} = E_0; M_{63} = E_0; M_{64} = E_0; M_{65} = E_0; M_{66} = E_0; \\
&M_{67} = E_0; M_{68} = E_0; M_{69} = E_0; M_{610} = E_0; M_{611} = E_0; M_{612} = E_0; \\
&M_{613} = E_0; M_{614} = D_Z A_1 A_{31} A_{32} A_{33} A_{34} E_9 A_{35} A_{36};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&M_{71} = E_0; M_{72} = E_0; M_{73} = E_0; M_{74} = E_0; M_{75} = E_0; M_{76} = E_0; \\
&M_{77} = E_0; M_{78} = E_0; M_{79} = A_{71}A_{72}A_{73}A_{74}A_{75}E_{\varphi}A_{76}; M_{710} = E_0; M_{711} = E_0; M_{712} = E_0; \\
&M_{713} = E_0; M_{714} = E_0; \\
&M_{81} = E_0; M_{82} = E_0; M_{83} = E_0; M_{84} = E_0; M_{85} = E_0; M_{86} = E_0; M_{87} = E_0; \\
&M_{88} = E_0; M_{89} = E_0; M_{810} = U_{510}; M_{811} = U_{511}; M_{812} = U_{512}; \\
&M_{813} = E_0; M_{814} = E_0; \\
&M_{91} = E_0; M_{92} = E_0; M_{93} = E_0; M_{94} = E_0; M_{95} = E_0; M_{96} = E_0; M_{97} = E_0; \\
&M_{98} = E_0; M_{99} = E_0; M_{910} = U_{510}; M_{911} = U_{510}; M_{912} = U_{510}; \\
&M_{913} = E_0; M_{914} = E_0; \\
&M_{101} = E_0; M_{102} = E_0; M_{103} = E_0; M_{104} = E_0; M_{105} = E_0; M_{106} = E_0; \\
&M_{107} = A_{71}A_{72}A_{73}A_{74}A_{75}E_{\varphi}A_{76}; M_{108} = E_0; M_{109} = E_0; M_{1010} = E_0; M_{1011} = E_0; M_{1012} = E_0; \\
&M_{1013} = E_0; M_{1014} = E_0; \\
&M_{111} = E_0; M_{112} = E_0; M_{113} = E_0; M_{114} = E_0; \\
&M_{115} = A_1A_{41}A_{42}A_{43}A_{44}E_{\varphi}A_{45}A_{46}; M_{116} = E_0; \\
&M_{117} = E_0; M_{118} = E_0; M_{119} = E_0; M_{1110} = E_0; \\
&M_{1111} = E_0; M_{1112} = E_0; M_{1113} = E_0; M_{1114} = E_0.
\end{aligned}$$

Математическая модель фронтального погрузчика

Таблица П5.1 Преобразование локальных систем координат

Номер звена	Звено	Связанная система координат	Параметры переноса координат осей						Матрицы перехода в систему координат	
			X_i	Y_i	Z_i	γ_i	ϑ_i	φ_i	$i-1$	$O_0X_0Y_0Z_0$
1	Задняя полурама	$O_1X_1Y_1Z_1$	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	A_1	$T_1 = A_1$
2	Задний мост	$O_2X_2Y_2Z_2$	l_{2x}	0	0	q_7	0	0	A_2	$T_2 = A_1 A_2$
3	Передняя полурамма	$O_3X_3Y_3Z_3$	l_{3x}	0	l_{3z}	0	0	q_8	A_3	$T_3 = A_1 A_3$
4	Рабочий орган	$O_4X_4Y_4Z_4$	l_{4x}	0	0	0	q_9	0	A_4	$T_4 = A_1 A_3 A_4$

Матрицы перехода:

$$A_1 = A_{11} \cdot A_{12} \cdot A_{13} \cdot A_{14} \cdot A_{15} \cdot A_{16}$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad A_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad A_{13} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_{14} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_4 & \sin q_4 & 0 \\ 0 & -\sin q_4 & \cos q_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad A_{15} = \begin{bmatrix} \cos q_5 & \sin q_5 & 0 & 0 \\ -\sin q_5 & \cos q_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_{16} = \begin{bmatrix} \cos q_6 & 0 & -\sin q_6 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin q_6 & 0 & \cos q_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos q_6 \cdot \cos q_5 & \sin q_5 & -\sin q_6 \cdot \cos q_5 & \mathbf{q}_1 \\ \sin q_6 \cdot \sin q_4 - & \cos q_5 \cdot \cos q_4 & \cos q_6 \cdot \sin q_4 + & \mathbf{q}_2 \\ -\cos q_6 \cdot \cos q_4 \sin q_5 & & +\sin q_6 \cdot \cos q_4 \sin q_5 & \\ \sin q_6 \cdot \cos q_4 + & -\cos q_5 \cdot \sin q_4 & \cos q_6 \cdot \cos q_4 - & \mathbf{q}_3 \\ +\cos q_6 \cdot \sin q_4 \sin q_5 & & -\sin q_6 \cdot \sin q_4 \sin q_5 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = A_{21} \cdot A_{22} \cdot A_{23} \cdot A_{24} \cdot A_{25} \cdot A_{26}$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \mathbf{l}_{2x} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{22} = E; A_{23} = E;$$

$$A_{24} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_7 & \sin q_7 & 0 \\ 0 & -\sin q_7 & \cos q_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{25} = E; A_{26} = E;$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \mathbf{l}_{2x} \\ 0 & \cos q_7 & \sin q_7 & 0 \\ 0 & -\sin q_7 & \cos q_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_3 = A_{31} \cdot A_{32} \cdot A_{33} \cdot A_{34} \cdot A_{35} \cdot A_{36}$$

$$A_{31} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \mathbf{l}_{3x} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{32} = E; A_{33} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \mathbf{l}_{3z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_{34} = E; A_{35} = E; A_{36} = \begin{bmatrix} \cos q_8 & 0 & -\sin q_8 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin q_8 & 0 & \cos q_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos q_8 & 0 & -\sin q_8 & \mathbf{l}_{3x} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin q_8 & 0 & \cos q_8 & \mathbf{l}_{3z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_4 = A_{41} \cdot A_{42} \cdot A_{43} \cdot A_{44} \cdot A_{45} \cdot A_{46}$$

$$A_{41} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \mathbf{l}_{4,x} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{42} = E; A_{43} = E;$$

$$A_{44} = E; A_{45} = \begin{bmatrix} \cos q_9 & \sin q_9 & 0 & 0 \\ -\sin q_9 & \cos q_9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_{46} = E;$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos q_9 & \sin q_9 & 0 & \mathbf{l}_{4,x} \\ -\sin q_9 & \cos q_9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

Матрицы скорости:

$$U_{11} = E_x A_{11} A_{12} A_{13} A_{14} A_{15} A_{16}; U_{12} = A_{11} E_y A_{12} A_{13} A_{14} A_{15} A_{16};$$

$$U_{13} = A_{11} A_{12} E_z A_{13} A_{14} A_{15} A_{16}; U_{14} = A_{11} A_{12} A_{13} E_\gamma A_{14} A_{15} A_{16};$$

$$U_{15} = A_{11} A_{12} A_{13} A_{14} E_\theta A_{15} A_{16}; U_{16} = A_{11} A_{12} A_{13} A_{14} A_{15} E_\varphi A_{16};$$

$$U_{17} = U_{18} = U_{19} = E_0;$$

$$U_{21} = U_{11} A_2; U_{22} = U_{12} A_2; U_{23} = U_{13} A_2; U_{24} = U_{14} A_2; U_{25} = U_{15} A_2; U_{26} = U_{16} A_2;$$

$$U_{27} = A_1 A_{21} A_{22} A_{23} E_\gamma A_{24} A_{25} A_{26};$$

$$U_{28} = U_{29} = E_0;$$

$$U_{31} = U_{11} A_3; U_{32} = U_{12} A_3; U_{33} = U_{13} A_3; U_{34} = U_{14} A_3; U_{35} = U_{15} A_3; U_{36} = U_{16} A_3;$$

$$U_{37} = U_{39} = E_0;$$

$$U_{38} = A_1 A_{31} A_{32} A_{33} A_{34} A_{35} E_\varphi A_{36};$$

$$U_{41} = U_{31} A_4; U_{42} = U_{32} A_4; U_{43} = U_{33} A_4; U_{44} = U_{34} A_4; U_{45} = U_{35} A_4; U_{46} = U_{36} A_4;$$

$$U_{47} = E_0; U_{48} = U_{38} A_{40};$$

$$U_{49} = A_1 A_{41} A_{42} A_{44} E_\theta A_{45} A_{46};$$

$$M_{11} = E_0; M_{12} = E_0; M_{13} = E_0; M_{14} = E_0; M_{15} = E_0; M_{16} = E_0;$$

$$M_{17} = E_0; M_{18} = D_z A_1 A_{31} A_{32} A_{33} E_\gamma A_{34} A_{35} A_{36}; M_{19} = E_0;$$

$$M_{21} = E_0; M_{22} = E_0; M_{23} = E_0; M_{24} = E_0; M_{25} = E_0; M_{26} = E_0;$$

$$M_{27} = E_0; M_{28} = D_z A_1 A_{31} A_{32} A_{33} E_\gamma A_{34} A_{35} A_{36}; M_{29} = E_0;$$

$$M_{31} = E_0; M_{32} = E_0; M_{33} = E_0; M_{34} = E_0; M_{35} = E_0; M_{36} = E_0;$$

$$M_{37} = D_z A_1 A_{21} A_{22} A_{23} E_\gamma A_{24} A_{25} A_{26}; M_{38} = E_0; M_{39} = E_0;$$

$$M_{41} = E_0; M_{42} = E_0; M_{43} = E_0; M_{44} = E_0; M_{45} = E_0; M_{46} = E_0;$$

$$M_{47} = D_z A_1 A_{21} A_{22} A_{23} E_\gamma A_{24} A_{25} A_{26}; M_{48} = E_0; M_{49} = E_0;$$

$$\begin{aligned}
M_{51} &= E_0; M_{52} = E_0; M_{53} = E_0; M_{54} = E_0; M_{55} = E_0; M_{56} = E_0; \\
M_{57} &= E_0; M_{58} = A_{31}A_{32}A_{33}A_{34}A_{35}E_{\varphi}A_{36}; M_{59} = E_0; \\
M_{61} &= E_0; M_{62} = E_0; M_{63} = E_0; M_{64} = E_0; M_{65} = E_0; M_{66} = E_0; \\
M_{67} &= E_0; M_{68} = E_0; M_{69} = A_{41}A_{42}A_{43}A_{44}E_{\vartheta}A_{45}A_{46}.
\end{aligned}$$

Обобщенная математическая модель

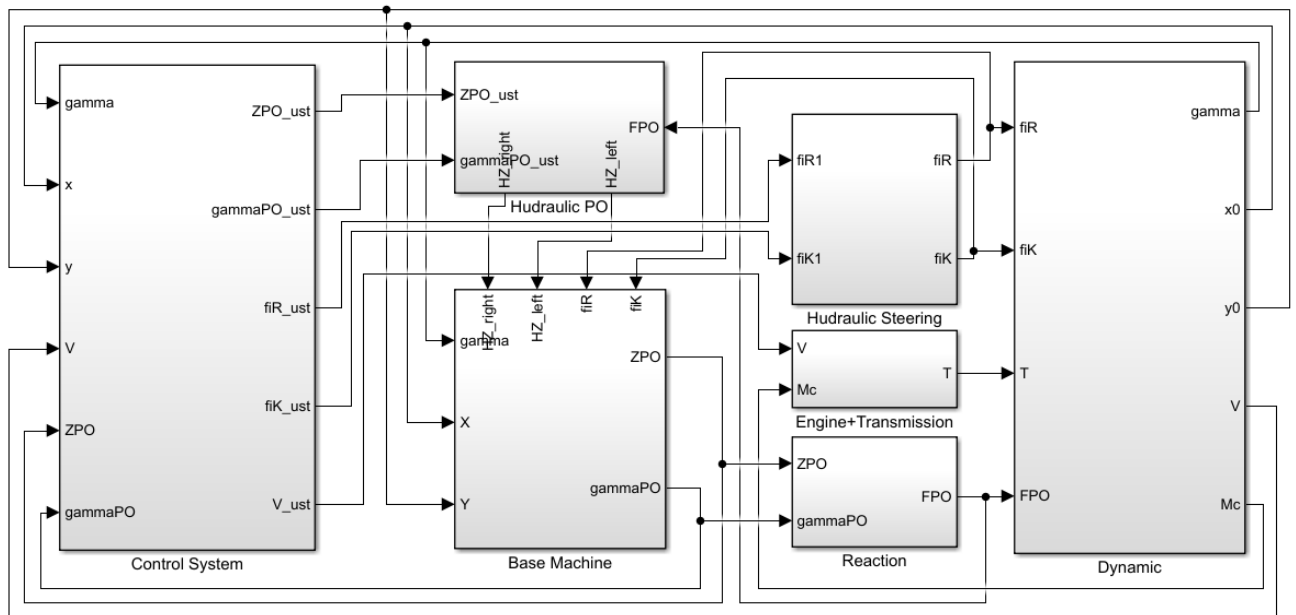


Рисунок П6.1 – Структурная схема обобщенной математической модели автогрейдера в обозначениях MATLAB Simulink

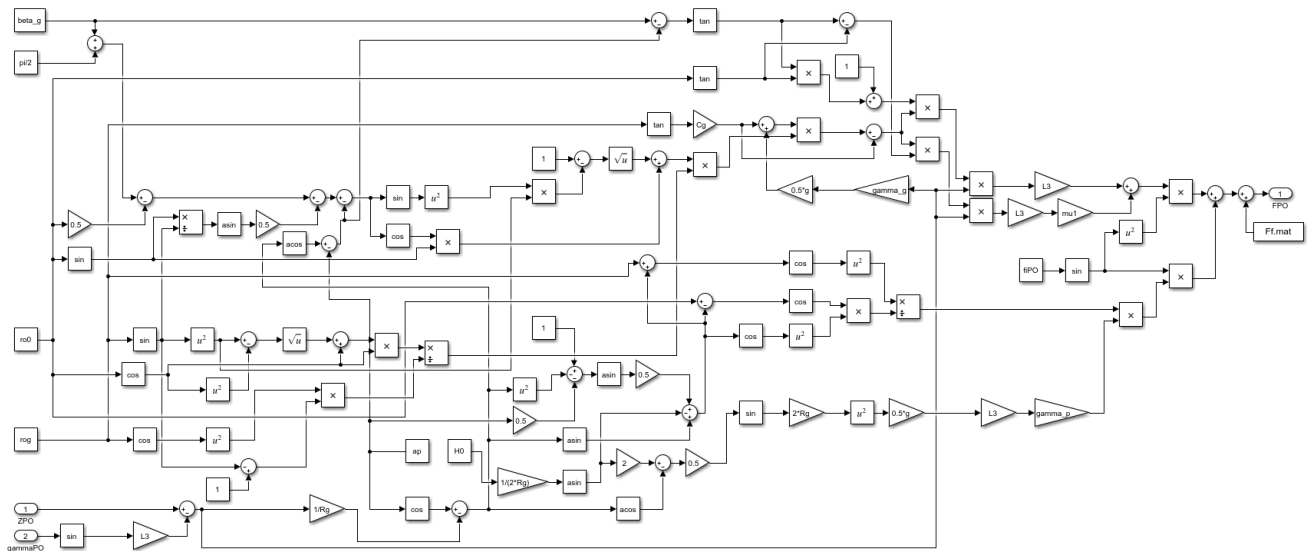


Рисунок П6.2 – Подсистема реакции грунта

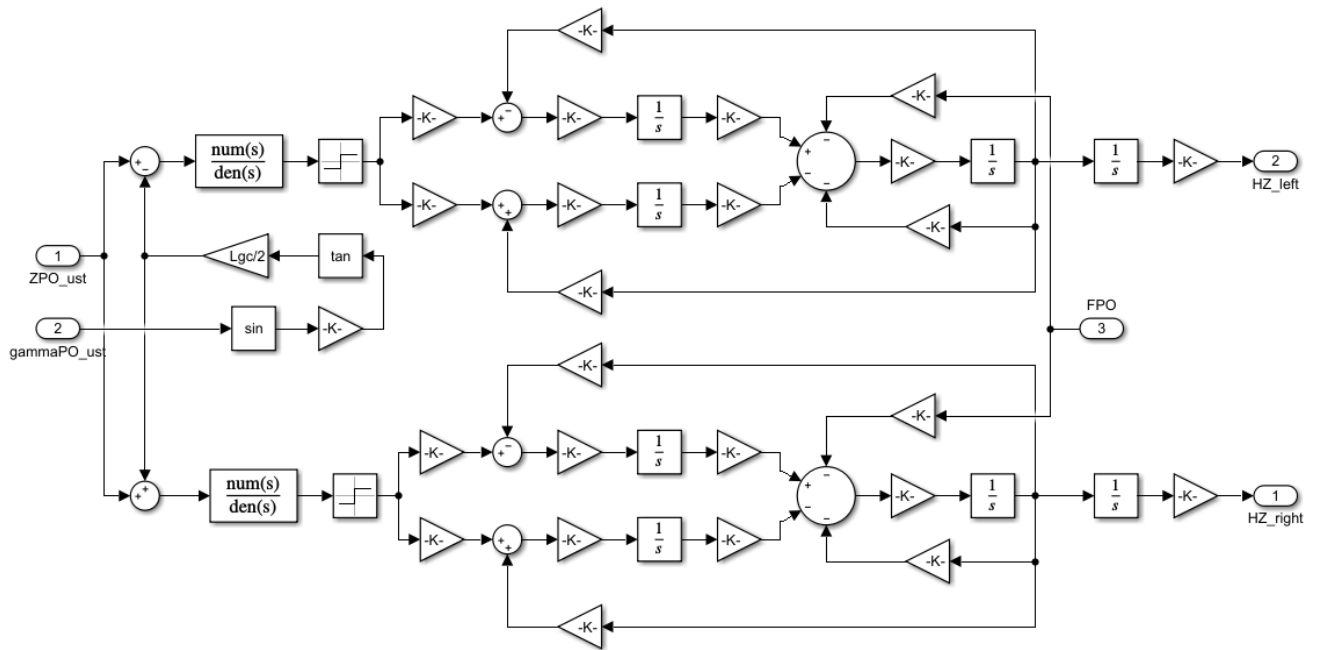


Рисунок П6.3 – Подсистема гидропривода рабочего органа

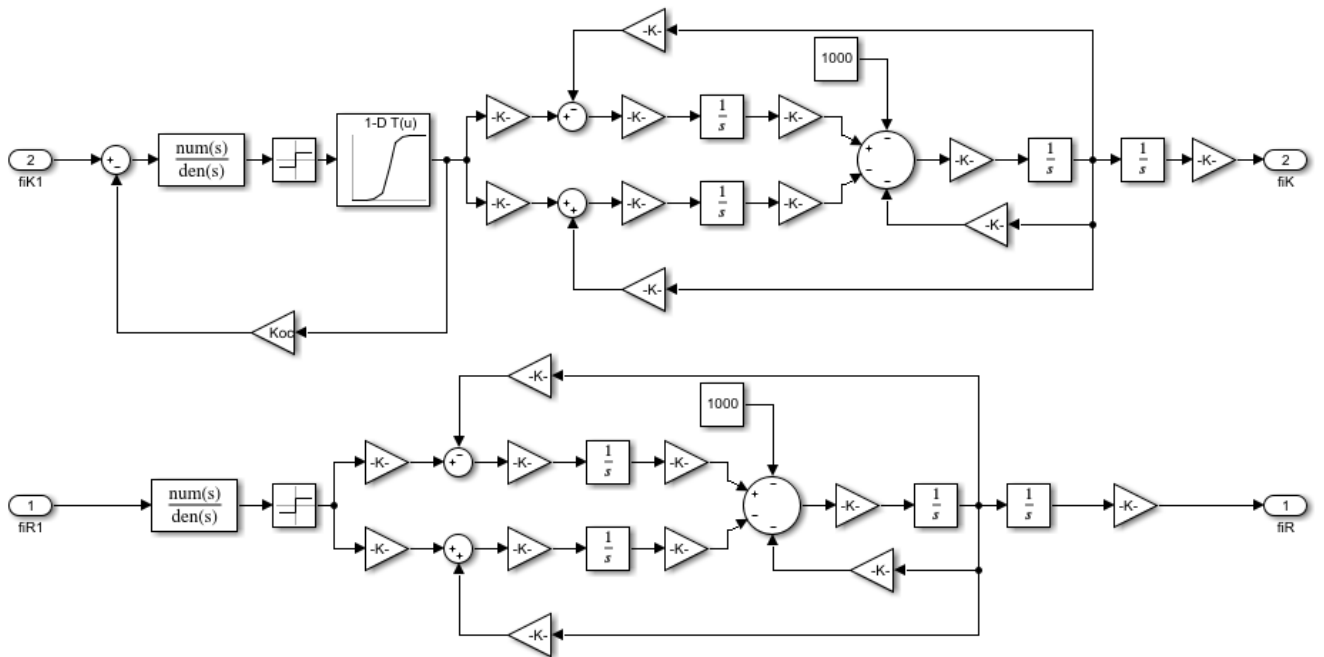


Рисунок П6.4 – Подсистема гидравлического рулевого управления

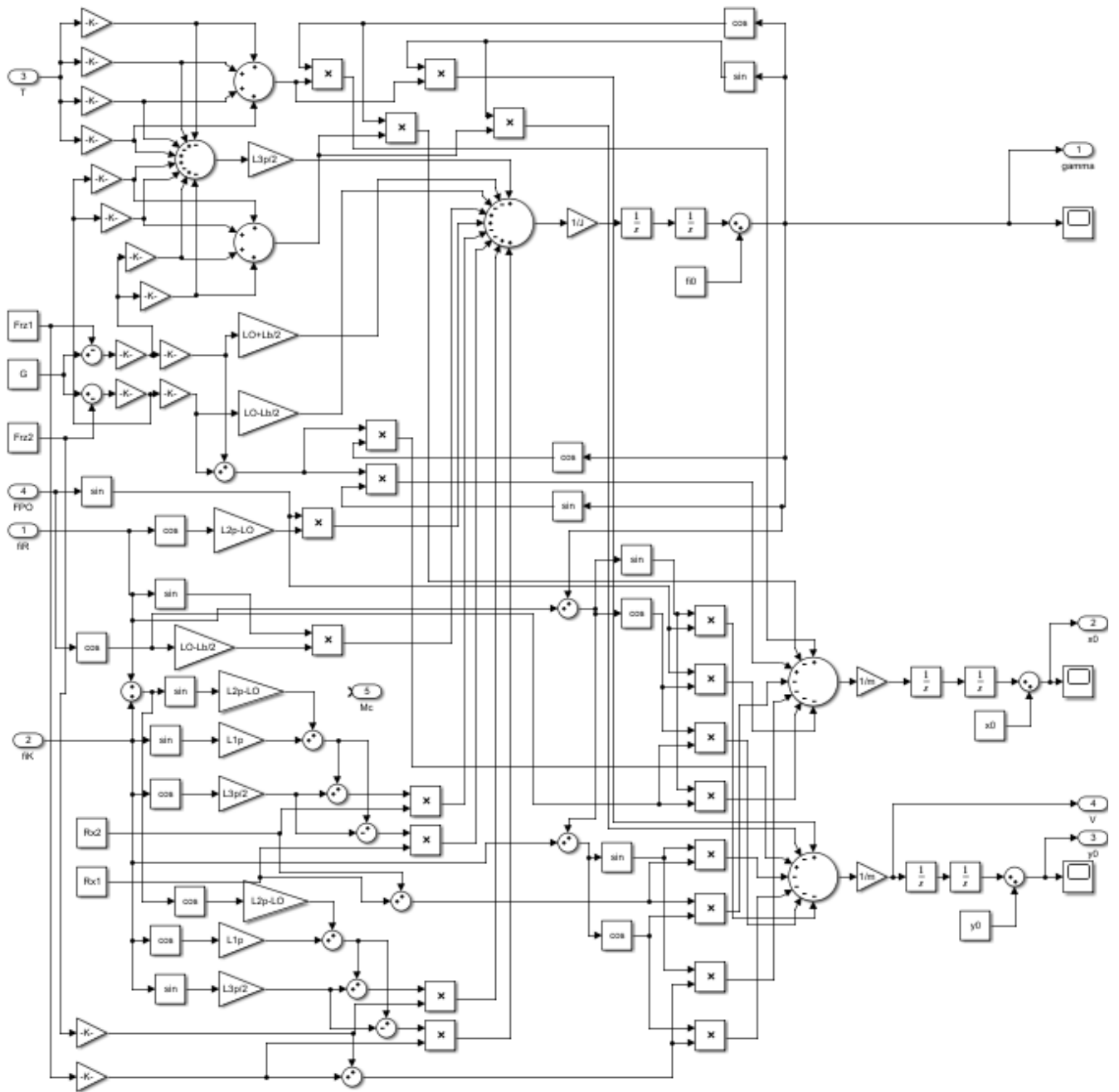


Рисунок Пб.5 – Подсистема динамики поворота

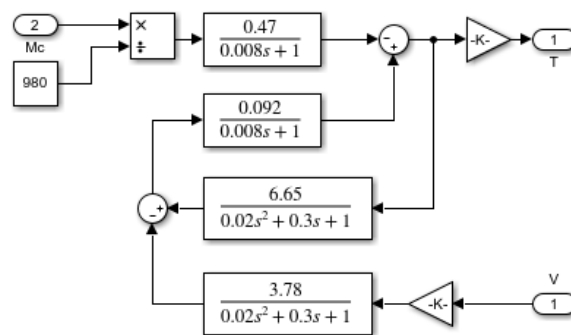


Рисунок Пб.6 – Подсистема двигателя и трансмиссии

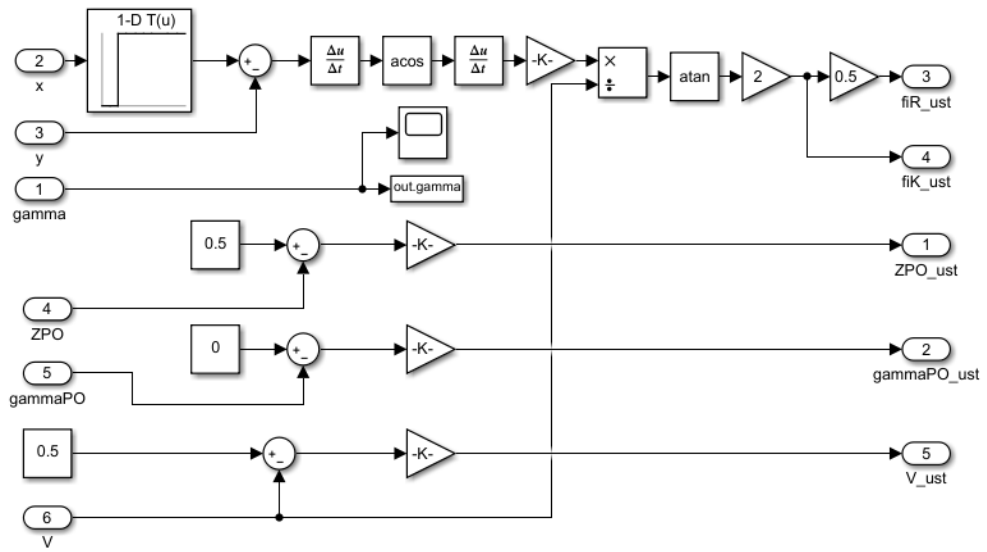


Рисунок Пб.7 – Подсистема управления