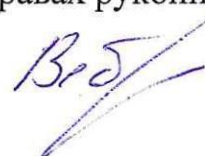


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ (СИБАДИ)»

На правах рукописи



ВЕБЕР ВИТАЛИЙ ВИКТОРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМ
ОРГАНОМ АВТОГРЕЙДЕРА В ТЯГОВОМ РЕЖИМЕ**

05.05.04 – «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
доктор технических наук,
доцент В.А. Мещеряков

Омск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА.....	13
1.1 Анализ работ по моделированию динамики рабочих процессов автогрейдера.....	13
1.2 Анализ работ по управлению рабочими процессами ЗТМ.....	16
1.3 Тенденции развития систем автоматического управления рабочим органом автогрейдера.....	20
1.4 Выводы по главе.....	23
2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЯГОВОГО РЕЖИМА АВТОГРЕЙДЕРА.....	25
2.1 Критерии эффективности автогрейдера.....	27
2.2 Структура модели управления тяговым режимом автогрейдера	28
2.2.1 Принятые допущения	29
2.2.2 Подсистемы модели тягового режима	30
2.2.3 Модель возмущающих воздействий	31
2.2.4 Модель гидропривода РО	34
2.2.5 Модель геометрии автогрейдера	35
2.2.6 Модель формирования призмы волочения	37
2.2.7 Модель формирования силы сопротивления копанию	39
2.3 Модель привода автогрейдера.....	40
2.3.1 Уравнения движения элементов привода автогрейдера	41
2.3.2 Алгоритм моделирования привода автогрейдера	44
2.3.3 Регрессионная модель расхода топлива.....	46
2.3.4 Модель буксования движителей.....	49
2.4 Программная реализация имитационной модели тягового режима	50
2.5 Выводы по главе	58

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЯГОВОГО РЕЖИМА АВТОГРЕЙДЕРА.....	60
3.1 Объект экспериментальных исследований	60
3.2 Условия, средства и порядок проведения экспериментальных исследований	61
3.3 Состав регистрирующего оборудования	61
3.4 Подготовка регистрирующей аппаратуры к работе	64
3.5 Результаты экспериментальных исследований	68
3.6 Подтверждение точности модели привода автогрейдера.....	74
3.7 Анализ зависимости коэффициента буксования от времени.....	75
3.8 Выводы по главе	80
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ РЕЖИМОМ АВТОГРЕЙДЕРА.....	82
4.1 Результаты имитационного моделирования тягового режима автогрейдера	82
4.2 Обобщение результатов имитационного моделирования тягового режима.....	97
4.2.1 Определение зависимостей технической производительности автогрейдера от характеристик показателей тягового режима	97
4.2.2 Определение зависимостей удельного расхода топлива от характеристик показателей тягового режима	99
4.3 Определение зависимости рекомендуемых значений силы сопротивления на РО от характеристик показателей тягового режима.....	102
4.4 Разработка модели системы управления отвалом автогрейдера	105
4.4.1 Структура системы управления и управляющего устройства	105
4.4.2 Алгоритм функционирования управляющего устройства	107
4.4.3 Рекомендации по проектированию системы управления рабочим органом автогрейдера	107

4.5 Оценка экономической эффективности применения системы автоматического управления рабочим органом автогрейдера	113
4.6 Рекомендации по расчету эксплуатационных показателей автогрейдера	116
4.7 Выводы по главе	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ..	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	126
ПРИЛОЖЕНИЯ	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Повышение эффективности землеройно-транспортных машин (ЗТМ) является важной задачей дорожно-строительной отрасли. Рациональный выбор параметров рабочих процессов машин, в частности, автогрейдеров, должен быть основан на теоретических положениях о зависимостях между показателями рабочих процессов.

Типовыми технологическими операциями, выполняемыми автогрейдерами при строительстве земляного полотна, являются планирование поверхности, перемещение и копание грунта. Способ управления рабочим органом определяет режим нагрузки на привод автогрейдера. Поскольку значительную долю времени тяжелые автогрейдеры используются на операциях копания и перемещения грунта, повышение эффективности тяжелых автогрейдеров в тяговом режиме является актуальной задачей.

При использовании автогрейдера в тяговом режиме человек-оператор управляет пространственным положением отвала, обеспечивая нужный объем срезаемого и перемещаемого грунта, поддерживая выбранную скорость движения машины и силу сопротивления на рабочем органе. Оператор при этом учитывает грунтовые условия, оценивает частоту оборотов двигателя и буксование движителей, выбирает поддерживаемое значение силы сопротивления на отвале на основе предыдущих рабочих проходов, собственного опыта и интуиции.

Для управления тяговыми режимами некоторые современные ЗТМ оснащаются системами автоматического управления отвалом (например, Caterpillar Automatic Traction-Control). Высотное положение отвала автоматически изменяется с целью снижения буксования движителей во время копания грунта и обеспечения максимальной производительности.

Формализация выбора поддерживаемых значений параметров тягового режима ЗТМ остается сложной проблемой. Для машин применяются различные критерии эффективности, оптимальные значения которых достигаются при раз-

личных комбинациях значений силы сопротивления на рабочем органе, скорости машины, коэффициента буксования движителей, характеристик профиля поверхности земляного полотна. Стохастический характер нагрузок и широкий диапазон изменений параметров рабочего процесса затрудняют обоснование параметров тягового режима для конкретных грунтовых условий.

Управление положением грейдерного отвала может осуществляться либо человеком-оператором (машинистом), либо системой автоматического управления. При решении задач управления необходимо рассматривать автогрейдер как нелинейную динамическую систему, функционирующую в условиях случайных воздействий. При создании систем автоматического управления рабочим органом ЗТМ поддерживаемое значение силы сопротивления копанию на отвале выбирается без оценки характеристик случайных возмущений. Необходим подход к выбору рациональных значений параметров тягового режима и системы управления рабочим органом для изменяющихся условий рабочего процесса с учетом производительности и топливной экономичности автогрейдера.

В связи с вышеизложенным, тема исследований, направленных на повышение эффективности управления рабочим органом тяжелого автогрейдера в тяговом режиме, является актуальной.

В диссертации предложен следующий подход к исследованию тягового режима. Множество реализаций рабочего процесса автогрейдера с различными комбинациями варьируемых параметров может быть получено методами математического, в частности, имитационного моделирования. Обобщение результатов имитационного моделирования позволяет найти новые зависимости между показателями тягового режима автогрейдера, критериями эффективности, конструктивными параметрами машины, параметрами внешних воздействий и системы управления.

Для обеспечения точности модели тягового режима автогрейдера как динамической системы автором выполнена модернизация имитационных моделей подсистем, предложены новые математические модели привода автогрейдера и оценки топливной экономичности, использована информация о динамических из-

менениях коэффициента буксования движителей, полученная автором экспериментально.

Имитационная модель тягового режима автогрейдера учитывает большое количество параметров машины, системы управления, внешних воздействий. Показатели рабочих процессов не всегда измеримы на практике (пространственные координаты рабочего органа и движителей, глубина резания грунта, объем примы волочения и т.д.). При проектировании систем управления необходимо выделить наиболее важные информационные каналы. В настоящей работе это динамически изменяющиеся значения силы сопротивления на рабочем органе и коэффициента буксования колесных движителей.

В работе доказано, что варьируемые параметры системы управления и внешних воздействий влияют на статистические характеристики силы сопротивления на рабочем органе, на оценки производительности и топливной экономичности машины. За счет снижения размерности пространства параметров тягового режима получены зависимости технической производительности (критерия оптимальности управления) от математического ожидания и среднеквадратического отклонения силы сопротивления. Такое обобщение позволяет в зависимости от характеристик силы сопротивления и коэффициента буксования выбрать оптимальное значение силы сопротивления, которое необходимо поддерживать на рабочем органе.

Материалы диссертации содержат обоснование задающих воздействий для проектирования систем автоматического управления рабочим органом автогрейдера, а также устройств индикации – ассистентов, помогающих оператору поддерживать рациональные значения силы сопротивления на отвале.

Степень разработанности темы исследования

Большое значение в развитии знаний о рабочих процессах ЗТМ и их детерминированных аналитических моделях сыграли работы ученых К.А. Артемьева, В.И. Баловнева, Ю.А. Ветрова, В.А. Жулай, А.М. Завьялова, А.Н. Зеленина, И.А. Недорезова, Н.А. Ульянова, А.М. Холодова и др. Стохастический характер показателей рабочих процессов, проблемы управления рабочими органами и тя-

говым режимом ЗТМ исследованы в работах ученых Т.В. Алексеевой, В.Ф. Амельченко, Б.А. Бондаровича, В.П. Денисова, Б.Д. Кононыхина, В.А. Мещерякова, В.Н. Тарасова, Д.И. Федорова, Л.А. Хмары, Л.Я. Цикермана, В.С. Щербакова и др. Работы предшествующих авторов формируют подходы к моделированию рабочих процессов автогрейдера и к созданию имитационных моделей систем управления тяговым режимом ЗТМ.

Цель диссертационного исследования: повышение эффективности управления рабочим органом автогрейдера в тяговом режиме за счет выбора рационального значения поддерживаемой силы сопротивления на рабочем органе с учетом случайного характера нагрузок и буксования движителей.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи**.

1. Модернизация математических моделей случайных возмущений, действующих на автогрейдер, моделей позиционирования автогрейдера и рабочего органа, формирования призмы волочения и силы сопротивления на рабочем органе, гидропривода рабочего органа и автоматического регулятора системы управления, оценки производительности автогрейдера.

2. Разработка математической модели привода автогрейдера.

3. Разработка математической модели оценки топливной экономичности машины.

4. Программная реализация имитационной модели тягового режима автогрейдера.

5. Проведение экспериментальных исследований тягового режима автогрейдера, оценка точности математической модели, сбор информации о динамике коэффициента буксования движителей.

6. Проведение вычислительных экспериментов на имитационной модели тягового режима, определение зависимостей между параметрами рабочего процесса, системы управления, показателями тягового режима, технической производительностью автогрейдера и удельным расходом топлива.

7. Обобщение результатов имитационного моделирования и определение зависимостей критериев эффективности от характеристик силы сопротивления на рабочем органе и коэффициента буксования.

8. Определение зависимостей рекомендуемого значения силы сопротивления на рабочем органе от характеристик силы сопротивления на рабочем органе и коэффициента буксования.

9. Разработка рекомендаций по проектированию структуры и алгоритмов функционирования системы управления тяговым режимом автогрейдера.

10. Разработка методики оценки влияния параметров тягового режима автогрейдера на техническую производительность и удельный расход топлива.

Объект исследований: рабочий процесс тяжелого автогрейдера в режиме копания грунта.

Предмет исследований: зависимости между показателями тягового режима автогрейдера, критериями эффективности, конструктивными параметрами машины, параметрами внешних воздействий и системы управления отвалом.

Рабочая гипотеза состоит в том, что заданное значение силы сопротивления на рабочем органе следует теоретически обосновывать с учетом характеристик случайных сигналов, измеренных во время предыдущих рабочих проходов: силы сопротивления на рабочем органе и коэффициента буксования движителей.

Научная новизна диссертационной работы заключается:

- в разработанной математической модели движения элементов привода автогрейдера;
- в регрессионных моделях оценки расхода топлива и мощности двигателя;
- в модернизированной имитационной модели тягового режима автогрейдера;
- в полученных зависимостях между экспериментально полученными показателями тягового режима;

- в новом понятии «доля времени повышенного буксования движителей»;
- в предложенной структуре системы управления рабочим органом автогрейдера, содержащей формирователь оптимального задающего воздействия;
- в полученных зависимостях между параметрами рабочего процесса, системы управления, показателями тягового режима, технической производительностью автогрейдера и удельным расходом топлива;
- в полученных зависимостях рекомендуемого значения силы сопротивления копания от среднеквадратического отклонения силы сопротивления и доли времени повышенного буксования.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Теоретическая значимость заключается в следующем:

- разработана новая математическая модель привода автогрейдера, позволяющая учесть нелинейный характер зависимостей между моментом сопротивления на колесном движителе, угловой скоростью вала двигателя и коэффициентом буксования движителей в динамике;
- в методику исследований тягового режима автогрейдера введен новый фактор – доля времени повышенного буксования движителей, что позволяет учесть динамически изменяющиеся грунтовые условия;
- теоретически обоснован выбор поддерживаемого значения силы сопротивления копания в зависимости от показателей, измеренных во время предыдущих рабочих проходов автогрейдера;
- предложена новая структура и алгоритмы функционирования системы управления тяговым режимом автогрейдера, позволяющая оптимизировать задающее воздействие по критерию технической производительности.

Практическая значимость заключается в следующем:

- разработана методика оценки влияния параметров тягового режима автогрейдера ДЗ-98 на техническую производительность и удельный расход топлива;

- разработано методическое обеспечение настройки бортового измерительного комплекса, включая процедуру тарировки датчика усилия рабочего органа автогрейдера с использованием регрессионной модели, и цифровой обработки информации об экспериментально полученных показателях рабочих процессов.

Методология и методы исследования

Методологической базой диссертационной работы послужил системный анализ причинно-следственных связей между показателями тягового режима автогрейдера, параметрами машины, внешних воздействий и системы управления. Исследования носят комплексный характер, содержат теоретические и экспериментальные разделы. Используются методы имитационного моделирования динамических систем, численного решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений, теории автоматического управления, математической статистики, цифровой обработки сигналов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель движения элементов привода автогрейдера.
2. Регрессионные модели оценки расхода топлива и мощности двигателя на основе многопараметровой характеристики двигателя.
3. Имитационная модель тягового режима автогрейдера.
4. Результаты экспериментальных исследований тягового режима автогрейдера.
5. Результаты исследования процесса управления тяговым режимом автогрейдера.
6. Рекомендации по выбору поддерживаемых значений силы сопротивления копанию на рабочем органе автогрейдера.

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

Апробация результатов работы

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на III Всероссийской научной конференции «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB», Санкт-Петербург, 2007; 63-й Научно-практической конференции ГОУ «СибАДИ», Омск, 2009; Всероссийской 65-й научно-технической конференции (с международным участием) «Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России», ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Омск, 2011; III Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации», ФГБОУ ВО «СибАДИ», Омск, 2018; V Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации», ФГБОУ ВО «СибАДИ», 2020.

Реализация результатов работы

Результаты работы приняты к внедрению в АО «Государственная компания «Северавтодор» и внедрены в образовательный процесс ФГБОУ ВО «СибАДИ».

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертационной работы соответствует требованиям паспорта научной специальности 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины» (п. 2 «Методы моделирования, прогнозирования, исследований, расчета технологических параметров, проектирования, испытаний машин, комплектов и систем, исходя из условий их применения» и п. 4 «Методы управления машинами, машинными комплектами и системами и контроля качества технологических процессов, выполняемых машинами»).

Публикации

По результатам исследований опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки РФ, и 5 статей в сборниках материалов научных конференций.

Диссертация выполнена на кафедре «Техника для строительства и сервиса нефтегазовых комплексов и инфраструктур» ФГБОУ ВО «СибАДИ».

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Для теоретического обоснования рациональных параметров тягового режима автогрейдера и решения проблем управления рабочим органом необходимо выбрать подход к моделированию рабочего процесса автогрейдера как сложной динамической системы, обосновать критерий эффективности управления тяговым режимом автогрейдера, а также направление совершенствования систем управления рабочим органом автогрейдера.

Анализ предшествующих работ также имеет целью подбор подходящих математических моделей взаимодействия рабочего органа с грунтом, буксования колесных движителей, моделей двигателя и трансмиссии, влияния координат микропрофиля грунтовой поверхности на положение отвала автогрейдера, моделей гидропривода подъема-опускания отвала, моделей систем автоматического управления отвалом автогрейдера. Этот подбор моделей нужен для их модернизации и объединения в общей имитационной модели тягового режима тяжелого автогрейдера с механической трансмиссией при ручном и автоматическом управлении отвалом.

1.1 Анализ работ по моделированию динамики рабочих процессов ЗТМ

В рабочих процессах ЗТМ необходимо выделять процессы взаимодействия рабочих органов со средой, формирования нагрузок, функционирования двигателя, трансмиссии, процессы взаимодействия движителей с грунтом, функционирования привода рабочего органа, процессы движения машины и позиционирования рабочего органа. В работах, посвященных математическому моделированию рабочих процессов ЗТМ, наблюдается две тенденции в подходах к разработке математических моделей элементов рабочих процессов. Модели, описывающие кинематику и динамику рабочего оборудования, гидропривода и трансмиссии, чаще всего представляют собой аналитические выражения, полученные на основе известных физических законов и информации об устройстве ЗТМ.

С точки зрения учета характера возмущений, действующих на ЗТМ со стороны среды, работы, направленные на исследование динамики рабочих процессов ЗТМ, можно разделить на две группы: в первой действующие на машину нагрузки считаются детерминированными, во второй учитывается вероятностный характер рабочих сопротивлений.

Тяговая динамика ЗТМ без учета вероятностного характера нагрузки была исследована во многих работах. Здесь следует особо выделить труды проф. Н.А. Ульянова, в которых на основе большого количества экспериментальных данных предложены методики построения статических тяговых характеристик ЗТМ, и подробно исследованы вопросы контакта колесных движителей ЗТМ с грунтом [106, 107].

Большое значение в развитии знаний о динамике рабочих процессов ЗТМ сыграла работа проф. В.Н. Тарасова [97], в которой исследованы процессы функционирования двигателя, трансмиссии, движителей, привода рабочего органа, и разработка моделей элементов рабочего процесса направлена на создание систем управления рабочими процессами.

Моделирование процесса копания грунта ЗТМ должно основываться на теориях предложенных проф. И. А. Недорезовым [72, 73, 74], А. Н. Зелениным [43], Н. Г. Домбровским [36]. Важную роль в теории копания грунта играют работы проф. К. А. Артемьева [11], В. И. Баловнева [14, 15, 16, 17], Ю. А. Ветрова [22].

Исследованию динамики процессов взаимодействия рабочих органов дорожно-строительных машин со средой посвящена работа проф. А. М. Завьялова [42].

В работе В. Г. Волобоева [23] исследованы вопросы формирования рабочих нагрузок, динамики рабочего оборудования и оптимизации геометрических параметров рабочего оборудования землеройных машин.

Вопросы моделирования кинематики и динамики рабочего оборудования, тяговой динамики, схем объемного гидропривода исследованы в работе проф. В.Ф. Амельченко [6]. Моделированию двигателей дорожных машин посвящена работа [13], в которой исследованы статические и динамические характеристики двигателей с учетом переменных нагрузок.

Динамика тяговых режимов ЗТМ при детерминированных рабочих нагрузках исследована в работе А. М. Холодова [113]. Инерционные свойства машин, жесткость металлоконструкций учитываются при выборе параметров рабочего процесса и конструкций машин.

В работах проф. Д. И. Федорова и Б. А. Бондаровича [111,112] на основе вероятностного представления рабочих нагрузок предложены подходы к моделированию случайных возмущений, действующих на ЗТМ.

В реальных условиях рабочего процесса момент сопротивления от рабочих нагрузок, приведенный к валу двигателя, носит случайный характер. В работе [2] исследованы методы получения оптимальных параметров рабочего процесса, исходя из случайности нагрузки.

В работах В. П. Денисова [30, 31] исследованы вопросы оптимизации тяговых режимов ЗТМ. Учтены нелинейные зависимости между параметрами рабочих процессов, влияющие на изменение закона распределения случайных значений скорости и тяговой мощности.

В работах В.А. Жулай [40] описаны различные типы взаимосвязей буксования и относительной силы тяги колесного движителя тяговых технологических машин, при различных типах грунта и пневматических шин.

На основе анализа работ, посвященных моделированию динамики рабочих процессов ЗТМ, сделаны следующие выводы. Моделирование перемещений автогрейдера и рабочего органа, динамики двигателя и трансмиссии автогрейдера следует осуществлять на основе аналитических моделей, связывающих показатели тягового режима и конструктивные параметры автогрейдера. Моделирование возмущений, действующих на автогрейдер со стороны неровностей грунтовой поверхности и от неоднородностей грунта, следует осуществлять на основе их известных статистических характеристик. В качестве критериев эффективности автогрейдера будут рассмотрены техническая производительность и удельный расход топлива на единицу объема вырезанного грунта.

1.2 Анализ работ по управлению рабочими процессами ЗТМ

В развитии средств автоматизации рабочих процессов ЗТМ можно выделить два основных направления. Первое имеет целью повышение точности управления рабочим органом автогрейдера при профилировании поверхности земляного полотна и малом объеме перемещаемого грунта. Второе направление – это наиболее полное использование тяговых возможностей автогрейдера при перемещении больших объемов грунта [1, 19].

В первом случае критерием качества строительных работ являются соответствие полученного профиля проектным отметкам, и площадь земляного полотна, обработанная за единицу времени. Во втором случае – объем перемещенного грунта в единицу времени и, в меньшей степени, ровность обработанной поверхности.

Большинство работ по автоматизации рабочих процессов ЗТМ направлено на развитие систем управления рабочим органом, двигателем и трансмиссией с целью повышения производительности, качества выполняемых работ и снижения нагрузки на человека-оператора.

В СибАДИ задачам совершенствования гидропривода рабочих органов ЗТМ и автоматизации рабочих процессов были посвящены работы проф. Т. В. Алексеевой [3, 4].

В работах проф. В.Ф. Амельченко рассмотрены вопросы оптимального управления рабочим органом при полном исключении человека из контура управления, либо выполнение части его функций [6].

В работах проф. В.С. Щербакова обобщен статистический материал о характеристиках случайных возмущений, действующих на ЗТМ, описаны теоретические основы повышения точности работ, выполняемых ЗТМ [119].

В работах В.А. Палеева рассмотрены гидромеханические системы стабилизации положения рабочего органа строительных и дорожных машин [77].

В работе В.В. Титенко выявлены закономерности влияния различных факторов на производительность планировочных работ, выполняемых автогрейдером.

Представлена обобщенная математическая модель, включающая в себя: модель базовой машины, систему управления, модель гидропривода, модель исходного микрорельефа и процесса взаимодействия рабочего органа с обрабатываемым грунтом [101].

В работах В.А. Мещерякова рассмотрены вопросы моделированию динамики рабочих процессов ЗТМ, описана методика идентификации и моделирования рабочих процессов ЗТМ на основе математического аппарата искусственных нейронных сетей [58].

Описание математической модели рабочего процесса рыхлительного агрегата как сложной динамической системы, представлены в работе В. А. Глушец [24].

В работах А.А. Кононова разработан способ управления рабочим органом ЗТМ, использующий в качестве управляющего воздействия изменение угла захвата отвала, а также определен текущий эффективный коэффициент полезного действия (КПД) машины, учтены изменения физико-механических свойств грунта [46, 47].

Обоснование критерия оптимального управления тяговым режимом ЗТМ непрерывного действия приведено в работе Н. А. Ульянова [106]. Доказано, что теоретическая производительность самоходных колесных ЗТМ с механической трансмиссией пропорциональна тяговой мощности. Динамика систем управления рабочими процессами ЗТМ исследована в работе В. Н. Тарасова [97], рассмотрены вопросы поведения человека-оператора, включенного в контур управления.

В работах Б.Д. Кононыхина [48, 49, 50] описан метод структурного объединения типовых агрегатных подсистем при создании динамических моделей рабочих процессов ЗТМ и синтезе систем управления. Проблемы учета нелинейностей в структуре динамических моделей рабочих процессов рассмотрены в работе Л.Я. Цикермана [1].

В работе В. П. Денисова [30] исследованы проблемы оптимального управления тяговым режимом ЗТМ с целью поддержания нагрузочного режима, оптимального по статистическим критериям оценки тяговой мощности.

Создание автоматизированных систем управления трансмиссией, и разработка методов определения законов управления муфтами блокировки дифференциалов в трансмиссии колесных машин предложены в работе Сафонова Б.А. [83]. Описан предложенный закон управления процессом включения кулачковой муфты. Продемонстрированы результаты численного эксперимента с использованием математической модели включения муфты.

Проблеме повышения проходимости автомобиля с межколесным дифференциалом ограничением буксования ведущих колес посвящена работа А.В. Келлер [45]. Описан способ повышения проходимости автомобиля во внедорожных условиях приложением тормозного момента к ведущему буксующему колесу. Предложен параметр системы ограничения буксования и определены его значения по условиям проходимости и устойчивости. В качестве характеристики систем ограничения буксования предложено использовать коэффициент подтормаживания.

В работах В.П. Тарасик [96] исследованы интеллектуальные системы управления автотранспортных средств. Разработана методика синтеза характеристик управления гидромеханической передачей. Изложены основы создания адаптивных систем управления автотранспортными средствами с применением современных методов и средств получения, обработки и представления информации.

Методика создания алгоритмов для систем управления фрикционными сцеплениями автомобильных автоматических трансмиссий исследована в работе А.Е. Есакова [39], разработана модульная имитационная математическая модель процесса буксования автоматически управляемого фрикционного сцепления, включающая модели автомобиля, двигателя внутреннего сгорания, дорожных условий и режимов трогания, алгоритма управления сцеплением и погрешностей оценки управляющих параметров.

В работе Д.С. Скибарко, Ю.А. Баркова [86] исследованы алгоритмы микропроцессорного управления дизельным двигателем. Предложена методика определения оптимального управления началом подачи топлива при испытаниях дизеля на моторном стенде и алгоритм реализации полученных экспериментальным путем оптимальных значений микропроцессорной системой управления. Представ-

лены алгоритмы реализации микропроцессорного регулирования частотой вращения коленчатого вала дизеля путем воздействия на управляемый объект (дизель) по каналу цикловой подачи топлива.

Автоматизированная оценка адаптивной системы управления транспортным дизелем и повышение её точности и быстродействия исследована в работе А.А. Третьякова [105], разработана методика автоматической оценки показателей качества переходного процесса дизельного двигателя с возможностью дальнейшего автоматического изменения настроек регулятора частоты вращения вала дизельного двигателя.

В работе Д.С. Лихачева [55] разработана методика прогнозирования динамической нагруженности трансмиссий транспортных средств с комбинированной энергоустановкой и определение параметров гасителей крутильных колебаний.

На основании обзора работ, посвященных развитию теории автоматического управления рабочими процессами ЗТМ, сделаны следующие выводы. Автогрейдер может быть оснащен управляющим устройством (УУ), формирующим управляющие сигналы включения электрогидравлических распределителей гидроцилиндров подъема-опускания отвала. Управляющее устройство в тяговом режиме должно осуществлять закон управления по отклонению, поддерживая заданное значение силы сопротивления на рабочем органе. Регуляторы могут иметь различную структуру и реализовывать различные алгоритмы управления (релейные регуляторы с зоной нечувствительности, пропорциональные, ПИД-регуляторы, нейросетевые) [20, 78, 59]. В настоящей работе в модели управления тяговым режимом автогрейдера использован наиболее простой релейный регулятор.

Недостаточно внимания в предшествующих работах уделяется обоснованию задающего воздействия (уставки) систем управления тяговым режимом, т.е. рекомендуемого значения силы сопротивления копания на рабочем органе. Сделан вывод о необходимости теоретического обоснования рекомендуемого значения силы сопротивления копания с учетом случайного характера нагрузок, буксования движителей и критерия эффективности автогрейдера.

1.3 Тенденции развития систем автоматического управления рабочим органом автогрейдера

На основании обзора источников информации о современных применяемых системах автоматического управления (САУ), которыми оснащаются ЗТМ, выявлены тенденции развития средств автоматизации рабочих процессов. Наиболее развито направление, имеющее целью повышение точности управления рабочим органом при профилировании поверхности земляного полотна, поддержание наибольшей технической производительности по объему вырезаемого грунта в единицу времени с обеспечением топливной экономичности, поддержание максимальной тяговой мощности.

Системы 3D LPS Topcon на основе использования роботизированных электронных тахеометров обеспечивают на сегодняшний день максимально возможную точность позиционирования рабочего оборудования машины. В тех случаях, когда допуск на формирование поверхности автогрейдером находится в пределах 1 сантиметра, а также, если на участке работ затруднен или невозможен прием спутниковых сигналов, оптимальным способом позиционирования автогрейдера для работы 3D системы управления является использование роботизированного электронного тахеометра (рисунок 1.1) [79].

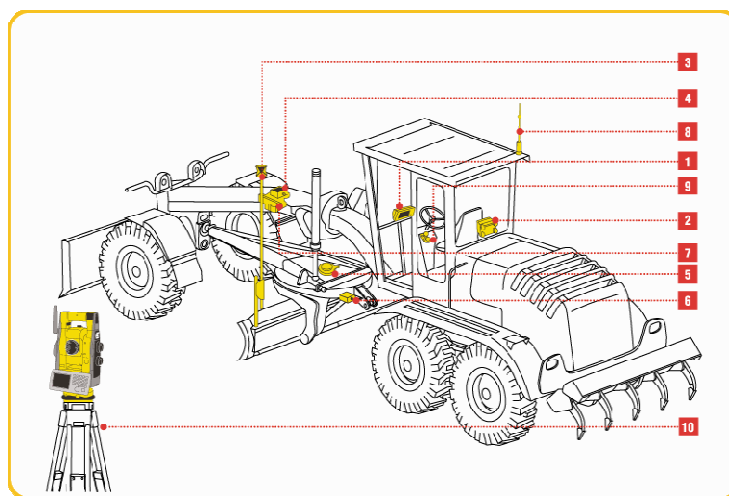


Рисунок 1.1 – Система 3D LPS Topcon

На автогрейдеры можно установить систему контроля уклона Trimble GCS900 3D.

Система автоматического управления рабочим органом САУРО компании «БЕЛГИДРОСИЛА ГРУПП» [80] предназначена для установки на автогрейдер и поддержания толщины срезаемого слоя грунта. Система оснащена с электромагнитным управлением гидрораспределителя. Оператор может выбрать автоматический или ручной режим управления положением рабочего органа по продольному профилю и/или поперечному уклону отвала (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Система нивелирования САУРО

Система управления СБУК разработана для выполнения задач управления строительными, землеройно-транспортными и тяговыми машинами с гидравлическими или электрическими приводами (рисунок 1.3). Применение системы СБУК позволяет: управлять исполнительными механизмами (пропорциональными и дискретными гидравлическими клапанами, соленоидными и т.п.), осуществлять контроль и индикацию параметров работы машины, осуществлять реализацию задач повышения безопасности, производительности и топливной экономичности.



Рисунок 1.3 – Контроллеры для машин с гидроприводом

Второе направление автоматизации рабочих процессов – наиболее полное использование тяговых возможностей машин при перемещении больших объемов грунта – представлено гораздо меньшим количеством серийно выпускаемых систем. Это обусловлено трудностью измерения и контроля важнейших показателей тяговых режимов ЗТМ, а также разнообразием внешних условий, в которых выполняется копание и перемещение грунта [80].

Необходимо отметить появление систем регулирования на основании информации о буксовании ведущих колес. Такая информация стала доступна благодаря массовому применению на тракторах радарных датчиков действительной скорости, действующих на основе эффекта Доплера [52].

Системы управления дизельными двигательными двигателями, устанавливаемыми на ЗТМ, представляют собой механические или электронные устройства регулирования впрыска топлива и подачи воздуха. Средства автоматизации моторно-трансмиссионной установки базовой машины позволяют осуществлять управление процессом переключения ступенчатых коробок передач без разрыва потоков мощности.

Ведущие производители продолжают совершенствовать системы автоматического управления двигателем, трансмиссией, гидросистемой и рабочими органами ЗТМ. Появление электронных управляющих устройств для отдельных подсистем и агрегатов ЗТМ делает возможным обмен данными о параметрах рабочих процессов между устройствами через бортовую вычислительную сеть. Однако до сих пор параметры управляющих устройств задаются при заводской или ручной пользовательской настройке систем управления и не изменяются во время рабочего процесса. В частности, настройка ширины зоны нечувствительности возможна при регулировании скорости штоков гидроцилиндров.

Сделан вывод о необходимости развития теоретической базы, позволяющей на основе измеряемой информации о показателях тягового режима настраивать управляющие устройства в соответствии с изменяющимися внешними условиями.

1.4 Выводы по главе

1. Выполнен анализ работ по исследованию динамики тяговых режимов ЗТМ, по управлению рабочим органом автогрейдера, обзор методов математического моделирования, методов экспериментальных исследований тягового режима и синтеза систем автоматического управления рабочими процессами автогрейдеров. Сделан вывод о необходимости теоретического обоснования задающего воздействия (поддерживаемого значения силы сопротивления на рабочем органе) при управлении отвалом автогрейдера. Под силой сопротивления копания на рабочем органе далее в тексте понимается горизонтальная составляющая силы сопротивления, действующая в шарнире крепления тяговой рамы к основной раме автогрейдера и направленная против курса движения машины.

2. В работах предшествующих авторов в недостаточном объеме представлена информация о динамических изменениях коэффициента буксования колесных движителей во время рабочих проходов автогрейдера. Необходим сбор экспериментальных данных.

3. В качестве критериев эффективности управления рабочим органом автогрейдера в тяговом режиме необходимо исследовать техническую производительность, а также удельный расход топлива на единицу объема вырезанного грунта.

4. Сформулирована идея работы: обобщение результатов имитационного моделирования тягового режима позволит найти новые зависимости между показателями тягового режима автогрейдера, критериями эффективности, конструктивными параметрами машины, параметрами внешних воздействий и системы управления отвалом.

5. Для моделирования и экспериментального исследования тягового режима тяжелого автогрейдера выбран автогрейдер с механической трансмиссией ДЗ-98В1. Управление гидрораспределителями подъема-опускания отвала у серийно выпускаемого автогрейдера осуществляется оператором вручную.

При теоретическом исследовании системы управления отвалом предполагается, что электрический сигнал управления электрогидрораспределителями формируется либо оператором с помощью кнопок панели управления системы, либо автоматическим регулятором (в частности, регулятором релейного типа с зоной нечувствительности).

2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЯГОВОГО РЕЖИМА АВТОГРЕЙДЕРА

Рабочий процесс тяжелого автогрейдера включает в себя два характерных режима: тяговый и транспортный. В настоящей работе исследован тяговый режим, при котором автогрейдер осуществляет копание и перемещение грунта. Особенностью тягового режима является наличие высоких значений сил сопротивлений, возникающих при взаимодействии рабочего органа с грунтом. Для рационального использования мощности двигателя и тяговых возможностей машины рекомендуется поддерживать номинальную силу тяги автогрейдера. Однако приходится учитывать случайный характер нагрузок на рабочем органе. Чтобы не допустить перегрузки двигателя при пиковых значениях силы сопротивления, а также предотвратить повышение буксования и снижение скорости машины, приходится выглублять отвал и снижать среднее поддерживаемое значение силы тяги.

В соответствии с этими требованиями изменяются глубина резания грунта и такие параметры рабочего процесса, как угол установки отвала в плане (угол захвата) $\alpha=35\dots50^\circ$, угол резания отвала (угол между касательной к поверхности ножа отвала, проведенной через режущую кромку, и плоскостью срезания грунта) $\beta=30\dots40^\circ$, угол наклона отвала (поперечный наклон отвала относительно горизонтали, влияющий на правильность поперечного профиля поверхности земляного полотна) $\gamma=3\dots20^\circ$ и длина захватки 100...400 м [19] в зависимости от возводимого объекта и рабочих операций. Установка положения отвала в пространстве перед рабочим проходом производится человеком-оператором с помощью гидрооборудования (гидроцилиндры выноса, подъема и опускания отвала, гидромотор поворота отвала).

При разработке математической модели тягового режима использованы параметры автогрейдера ДЗ-98В1 с колесной схемой 1×3×3 (рисунок 2.1, таблица 2.1).



Рисунок 2.1 – Автогрейдер ДЗ-98В1

Таблица 2.1 - Технические характеристики автогрейдера ДЗ-98

Класс автогрейдера	250
Эксплуатационная масса m , кг	19500
Грейдерный отвал	
Длина отвала B , мм	4200
Высота отвала с ножами, мм	700
Угол резания β , °	30...70
Двигатель	
Тип	дизельный
Модель	ЯМЗ-238НДЗ
Номинальная мощность, кВт	173
Номинальная частота вращения n_e , об/мин	1700
Трансмиссия	
Тип	механическая, с приводом на все колеса

Выбранными критериями эффективности работы автогрейдера являются техническая производительность Π_m и удельный расход топлива g_{Π} [12, 59].

Техническая производительность автогрейдера при копании зависит от глубины резания грунта и действительной скорости автогрейдера. Обычно проходы по вырезанию грунта выполняются на первой передаче трансмиссии, когда сила тяги максимальна, что позволяет за один проход вырезать максимальное количе-

ство грунта и сократить тем самым общее число проходов. Машинист автогрейдера (человек-оператор) при помощи педали акселератора выбирает режим работы на внешней нагрузочной характеристике двигателя.

Для достижения максимальной производительности необходимо управлять следующими показателями: глубина резания h и объем призмы волочения V_{np} , значение силы сопротивления копанию на рабочем органе автогрейдера P . При этом необходимо учитывать развиваемый двигателем крутящий момент M_e , угловую скорость выходного вала двигателя ω_e , теоретическую скорость (без учета буксования) машины v_m , действительную скорость машины v , коэффициент буксования δ , часовой расход топлива G_e , тяговую мощность автогрейдера N .

2.1 Критерии эффективности автогрейдера

Модель расчета критериев эффективности удельного расхода топлива g_{Π} и технической производительности Π_m (рисунок 2.2) содержит алгоритм расчета производительности с учетом площади стружки вырезаемого грунта и действительной скорости. Удельный расход топлива g_{Π} рассчитан с учетом часового расхода топлива и производительности.

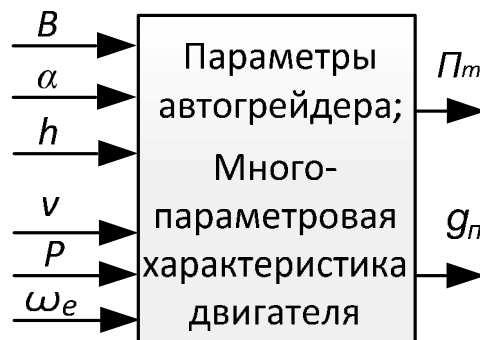


Рисунок 2.2 – Функциональная схема расчета критериев эффективности

Техническая часовая производительность автогрейдера [94, 118]:

$$\Pi_T = \frac{3600 \cdot S_e \cdot v}{1000}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2.1)$$

где S_{Γ} - площадь сечения вырезаемой стружки грунта в проекции на плоскость, перпендикулярную к направлению движения, м^2 ;

v - действительная скорость автогрейдера, м/с .

$$S_2 = B \cdot \cos(\alpha) \cdot h, \quad (2.2)$$

где B - длина отвала, м ;

α - угол захвата, град;

h - глубина резания, м .

Для расчета использовалась $h=h_{cp}$, которая определяется как среднее значение глубины резания по левой и правой колеям левой и правой стороной отвала:

$$h_{cp} = \frac{h_l + h_{np}}{2}. \quad (2.3)$$

Сила сопротивления P влияет на момент сопротивления M_c , приведенный к валу двигателя, на частоту вращения вала двигателя n_e и на выбор рабочей точки на многопараметровой характеристике двигателя [12], которой соответствуют значения мощности двигателя N_e и удельного расхода топлива g_e .

Часовой расход топлива [106]

$$G_e = N_e \cdot g_e / 1000, \text{ кг/ч}, \quad (2.4)$$

где N_e - мощность двигателя, кВт;

g_e - удельный расход топлива, $\text{г/кВт}\cdot\text{ч}$.

Удельный расход топлива на 1 м^3 вырезанного отвалом автогрейдера грунта:

$$g_{\Pi} = \frac{G_e}{\Pi_m}, \text{ кг/м}^3. \quad (2.5)$$

Модели расчета критериев использованы в общей модели тягового режима для оценки эффективности управления отвалом во время рабочих проходов.

2.2 Структура модели управления тяговым режимом автогрейдера

Управление высотным положением правой и левой сторон отвала осуществляется при помощи гидрораспределителей с электрическим управлением. Электрические сигналы включения гидрораспределителей правого и левого гидроцилиндров обозначены c_n и c_l .

Управляемой величиной, зависящей от времени t , является сила сопротивления копанию на рабочем органе автогрейдера $P(t)$, измеренная в шарнире крепления тяговой рамы к основной раме машины (сила сопротивления копанию). Необходимо формировать управляющие сигналы c_n и c_l таким образом, чтобы разница (ошибка управления e) между заданным $P_{зад}(t)$ и текущим $P(t)$ значениями силы была минимальной (закон управления по отклонению).

Поскольку человек-оператор использует при управлении тяговым режимом оценку действительной скорости машины $v(t)$ и оценку коэффициента буксования $\delta(t)$, эти информационные каналы также включены в модель управления тяговым режимом.

В процессе ручного управления тяговым режимом автогрейдера (рисунок 2.3) функции управляющего устройства (УУ) выполняет человек-оператор. За динамический объект управления (ОУ) принят рабочий процесс автогрейдера. В настоящей работе разработана модель тягового режима автогрейдера, позволяющая исследовать динамику объекта управления. Ниже приведено описание подсистем этой модели.

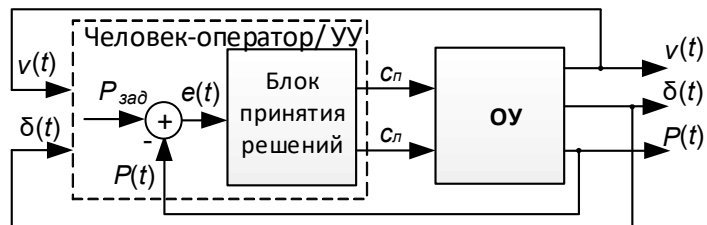


Рисунок 2.3 – Модель управления тяговым режимом автогрейдера

2.2.1 Принятые допущения

Использование аналитических зависимостей для описания тягового режима автогрейдера сопряжено с существенным упрощением модели и принятием большого количества допущений.

В работе приняты допущения:

- исследовано прямолинейное горизонтальное движение машины;

- конструкция автогрейдера считается абсолютно жесткой;
- не учитываются люфты и трение между элементами рабочего оборудования;
- не учитываются упруго-демпфирующие свойства движителей;
- координаты обработанной поверхности грунта полностью определяются координатами режущей кромки рабочего органа;
- сечение призмы волочения в плане принято считать треугольным;
- высота грунта $h(t)$, вырезаемого в момент времени t , постоянна по всей длине отвала и равна $h(t) = h_{cp}(t)$.
- динамические характеристики дизеля с регулятором подачи топлива и заменены статическими;
- не учитывается отбор мощности двигателя на привод рабочего органа и вспомогательных механизмов;
- скорость движения штоков гидроцилиндров одинакова при подъеме и заглублении рабочего органа и не зависит от приложенных нагрузок;
- сила сопротивления перекачиванию машины является постоянной;
- при моделировании возмущений было принято допущение о постоянной скорости машины, в частности, средняя скорость $v = 1$ м/с;
- при управлении высотным положением отвала автогрейдера в тяговом режиме на оба гидрораспределителя цилиндров подается один и тот же управляющий сигнал $c(t) = c_n(t) = c_l(t)$, и исследуется одноканальная система управления.

Большинство допущений при моделировании тяговых режимов автогрейдера компенсируется случайными флуктуациями силы сопротивления на рабочем органе, т.е. учет немоделируемой динамики рабочих процессов сводится к формированию случайных возмущений, действующих на автогрейдер.

2.2.2 Подсистемы модели тягового режима

При разработке математической модели тягового режима автогрейдера модернизированы и разработаны следующие подсистемы: модель геометрии авто-

грейдера, модель формирования призмы волочения, модель привода автогрейдера, модель гидропривода рабочего органа (РО), модель возмущающих воздействий, модель формирования силы сопротивления копанию, модель буксования движителей (рисунок 2.4).

Наиболее важным фактором, влияющим на ход рабочего процесса автогрейдера, является сила сопротивления копанию грунта P , действующая на рабочий орган.

Общая структура модели формирования момента сопротивления на движителях (рисунок 2.4) показана на примере разработки математических моделей автогрейдера, при разработке грунта в режиме копания и перемещения грунта.

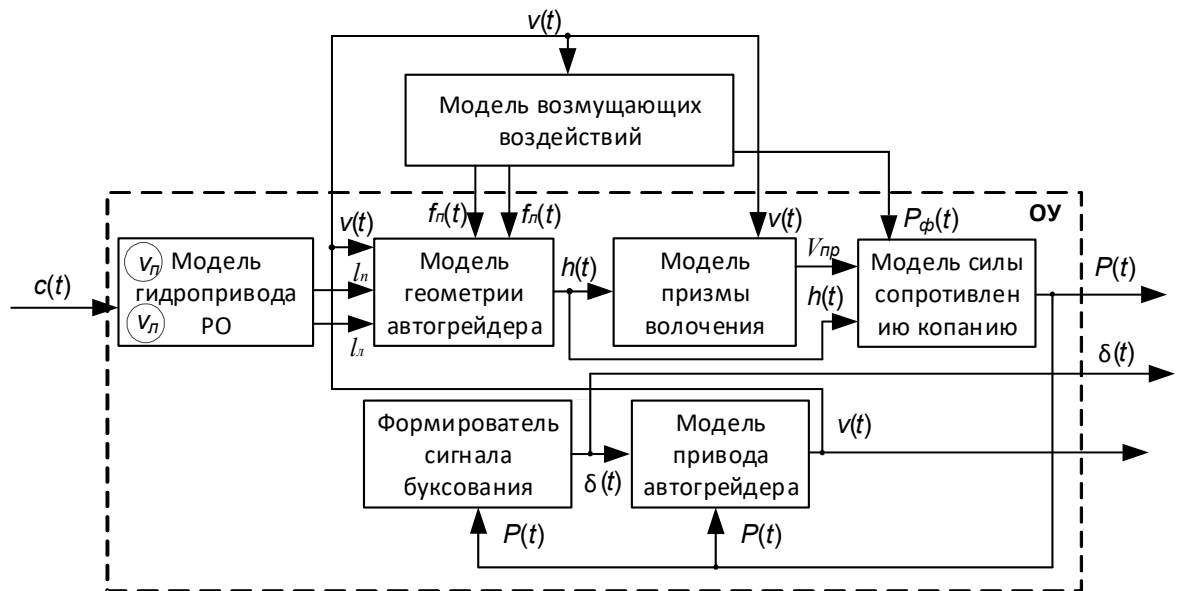


Рисунок 2.4 – Структурная схема модели тягового режима

Моделируемые показатели тягового режима соответствуют сигналам – связям между блоками схемы. Варьируемые параметры автогрейдера и рабочего процесса соответствуют параметрам блоков модели.

2.2.3 Модель возмущающих воздействий

Основными факторами, влияющими на неравномерность силы сопротивления копанию грунта P , является случайное изменение глубины резания грунта,

обусловленное случайными колебаниями высотных координат рабочего органа, а также случайное изменение физико-механических свойств грунта.

Случайные высотные координаты микропрофиля грунтовой поверхности по правой и левой колеям f_n и f_l , а также случайные флюктуации силы сопротивления копанию P_ϕ моделируются как случайные сигналы – последовательности случайных чисел, пропущенные через формирующие фильтры для задания взаимосвязей между отсчетами сигналов [58].

Формирование случайных сигналов, используемых в имитационной модели тягового режима автогрейдера, показано на примере формирования случайной высотной координаты микропрофиля грунтовой поверхности f (рисунок 2.5).

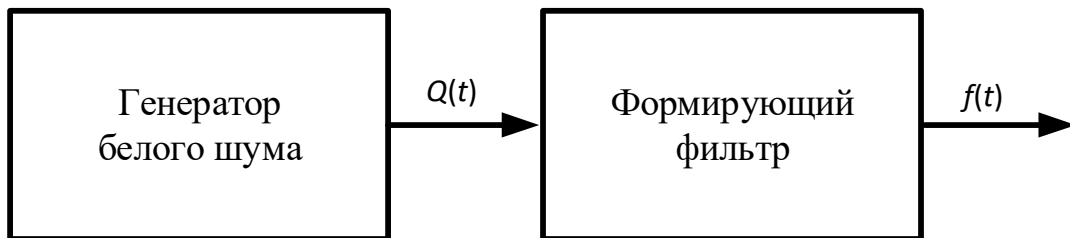


Рисунок 2.5 – Формирование случайных воздействий

Входом формирующего фильтра модели является $Q(t)$ – нормально распределенный дискретный белый шум [589]. Белый шум представляет собой некоррелированную последовательность случайных чисел с математическим ожиданием $M\{Q\} = 0$ и дисперсией $\sigma^2\{Q\} = 1$. Генерация производится программно с помощью датчика случайных чисел. Для генерации белого шума (случайных чисел) в среде MATLAB/Simulink использован блок Band Limited White Noise [38,117].

Белый шум должен быть преобразован в автокоррелированный сигнал с заданной нормированной автокорреляционной функцией [30, 112, 119]:

$$K_\phi(l) = e^{-\alpha'|l|} \cos\beta' l, \quad (2.6)$$

где l – путевая координата, м;

α' – параметр, характеризующий затухание корреляции;

β' – параметр, характеризующий периодичность корреляции.

Пересчет путевой координаты l во временную t зависит от действительной скорости машины v :

$$t = l/v.$$

Формирующий фильтр имеет передаточную функцию [589]

$$W(p) = \sqrt{\frac{2\alpha'}{v}} \frac{\frac{1}{v} p + \sqrt{\alpha'^2 + \beta'^2}}{\frac{1}{v^2} p^2 + \frac{2\alpha'}{v} p + (\alpha'^2 + \beta'^2)} \quad (2.7)$$

где α' , β' – параметры корреляционной функции возмущения [30, 59];

p – оператор дифференцирования;

Нормированный безразмерный сигнал на выходе формирующего фильтра нужно умножить на среднеквадратическое отклонение моделируемой случайной величины, в частности, на среднеквадратическое отклонение высотной координаты микропрофиля грунтовой поверхности $\sigma\{f\}$, м.

Аналогичным образом формируются нормированные случайные флуктуации P_ϕ силы сопротивления копанию, вызванные неоднородностью грунта. Значения диапазонов α' и β' для различных грунтов приведены в таблице 2.2 [119]. Пример нормированной автокорреляционной функции приведен на рисунке 2.6.

Таблица 2.2 – Коэффициенты корреляционной функции

Параметр	Предел прочности грунта, МПа			
	0 – 0,2	0,2 – 0,4	0,4 – 0,6	1,0 – 5,0
α'	0,8 – 1,5	1,2 – 1,8	1,5 – 2,0	3 – 5
β'	2,5 – 8	4 – 10	6 – 12	10 – 30

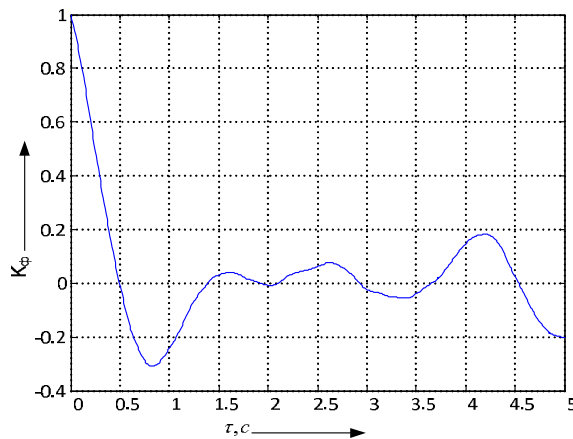


Рисунок 2.6 – Автокорреляционная функция силы сопротивления грунта копанию

Среднеквадратическое отклонение силы сопротивления $\sigma\{P\}$ связано с математическим ожиданием $M\{P\}$ коэффициентом вариации, значение которого лежит в диапазоне $\psi = 0,09 \dots 0,17$ [31]:

$$\sigma\{P\} = M\{P\} \cdot \psi \quad (2.8)$$

Для имитационного моделирования возмущающих воздействий, вызванных грунтовыми условиями, дифференциальное уравнение формирующего фильтра с коэффициентами, зависящими от скорости v , реализовано в виде подсистемы MATLAB/Simulink. Выходом подсистемы является случайный нормированный коррелированный сигнал P_ϕ с заданными статистическими характеристиками, соответствующими тяговому режиму тяжелого автогрейдера.

Таким образом, выполнена модернизация модели возмущающих воздействий для имитационного моделирования тягового режима автогрейдера ДЗ-98.

2.2.4 Модель гидропривода РО

Текущие значения перемещений штоков l_n и l_l правого и левого гидроцилиндров подъема-опускания отвала зависят от заранее настроенной скорости штоков v_n и v_l . Эти параметры предварительно выбраны по аналогу системы управления рабочим органом автогрейдера – системе 3D LPS Topcon, в которой скорость штоков гидроцилиндров составляет 15 мм/с [64]. При исследовании имитационной модели эти параметры варьировались.

Модель гидропривода рабочего органа характеризуется также временем запаздывания срабатывания гидросистемы τ_{zn} ; движение штока гидроцилиндра моделируется с помощью интегрирующего звена [6, 10, 60]. Управляющее воздействие на входе модели представляет собой сигнал включения гидроцилиндров $c \in \{-1; 0; 1\}$ для релейного регулятора (с трехпозиционными гидрораспределителями), $c \in [-1; 1]$ – для пропорционального регулятора (с гидрораспределителями пропорционального типа).

Выполнена модернизация модели гидропривода рабочего органа, включенной в общую имитационную модель тягового режима автогрейдера.

2.2.5 Модель геометрии автогрейдера

Определение высотных координат правой $y_n(t)$ и левой $y_l(t)$ сторон отвала производилось с учетом случайных изменений координат передних колес автогрейдера f_n и f_l необработанного микропрофиля грунтовой поверхности, по которой движется автогрейдер. Случайные изменения координат микропрофиля грунтовой поверхности вызывают нежелательные отклонения отвала автогрейдера от проектных отметок при профилировании земляного полотна, а также вызывают случайные колебания глубины резания грунта.

$$f_{cp}(t) = (f_n(t) + f_l(t)) / 2. \quad (2.9)$$

Большое влияние на динамику позиционирования рабочего органа оказывает геометрия конструкции автогрейдера. В настоящей работе учитывались следующие геометрические параметры автогрейдера: длина базы L , расстояния от отвала в плане (по продольной оси автогрейдера) до оси балансиров L_1 , до точки крепления передней оси L_2 , до передних колес балансиров L_3 , до задних колес балансиров L_4 , а также действительная скорость движения машины v . На пространственное положение РО оказывают влияние величина угла захвата α и ширина колеи автогрейдера G (рисунок 2.7). Условимся далее указывать расстояние между сторонами отвала и колесами в плане по колеям автогрейдера.

Выходными величинами являются высотные координаты правой $y_n(t)$ и левой $y_l(t)$ сторон отвала, а также глубина резания грунта по правой $h_n(t)$ и левой $h_l(t)$ колеям.

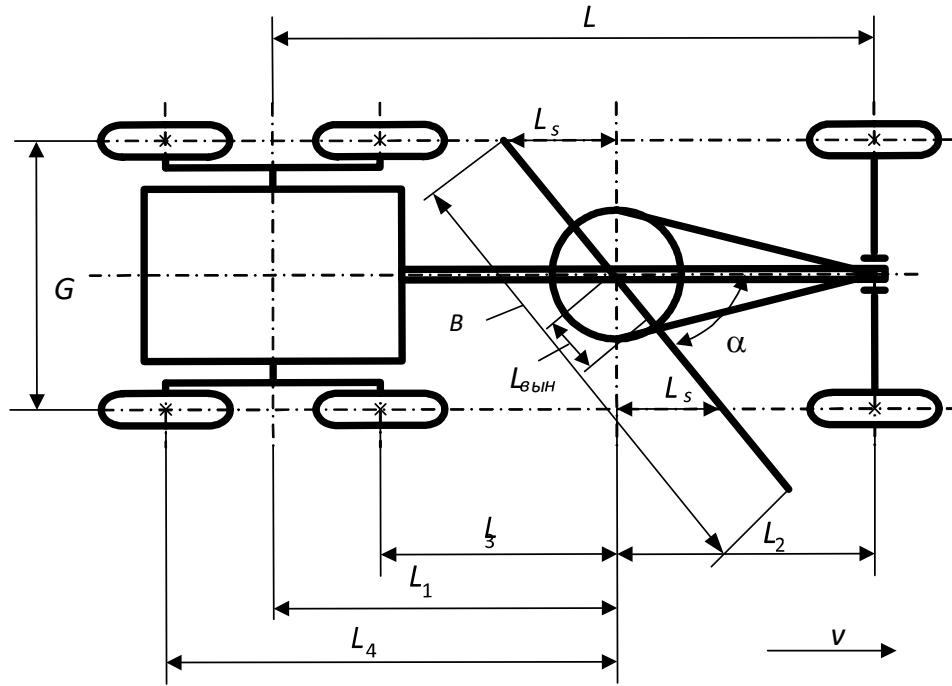


Рисунок 2.7 Геометрические параметры автогрейдера

Для вычисления глубины резания грунта по каждой колее необходимо определить время запаздывания $\tau_{отв}$ отвала относительно передней оси [59].

Выполнена модернизация математической модели [59], описывающей влияние отклонений координат микропрофиля грунтовой поверхности на координаты рабочего органа автогрейдера и глубину резания грунта с учетом основных геометрических параметров тяжелого автогрейдера. Для имитационного моделирования рабочего процесса автогрейдера в MATLAB/Simulink разработана подсистема Geometry вычисления коэффициентов модели и переменных запаздываний, зависящих от скорости автогрейдера (рисунок 2.8). Входами подсистемы являются длина базы автогрейдера L , расстояние от отвала до передней оси L_2 , расстояние между осями ведущих колес балансира L_{bal} , ширина колеи G , угол захвата α и переменная скорость автогрейдера v . Выходом являются неизменные во время рабочих проходов значения коэффициентов K_{ln} , K_{l_l} , $0,5K_{21n}$, $0,5K_{22n}$, $0,5K_{21l}$, $0,5K_{22l}$, а также переменные значения времени запаздывания отвала и ведущих колес автогрейдера $\tau_{n\text{ отв}}$, $\tau_{l\text{ отв}}$, τ_{nn} , τ_{nz} , τ_{ln} , τ_{lz} . В модели Simulink переменное время запаздывания представлено блоками Variable Delay.

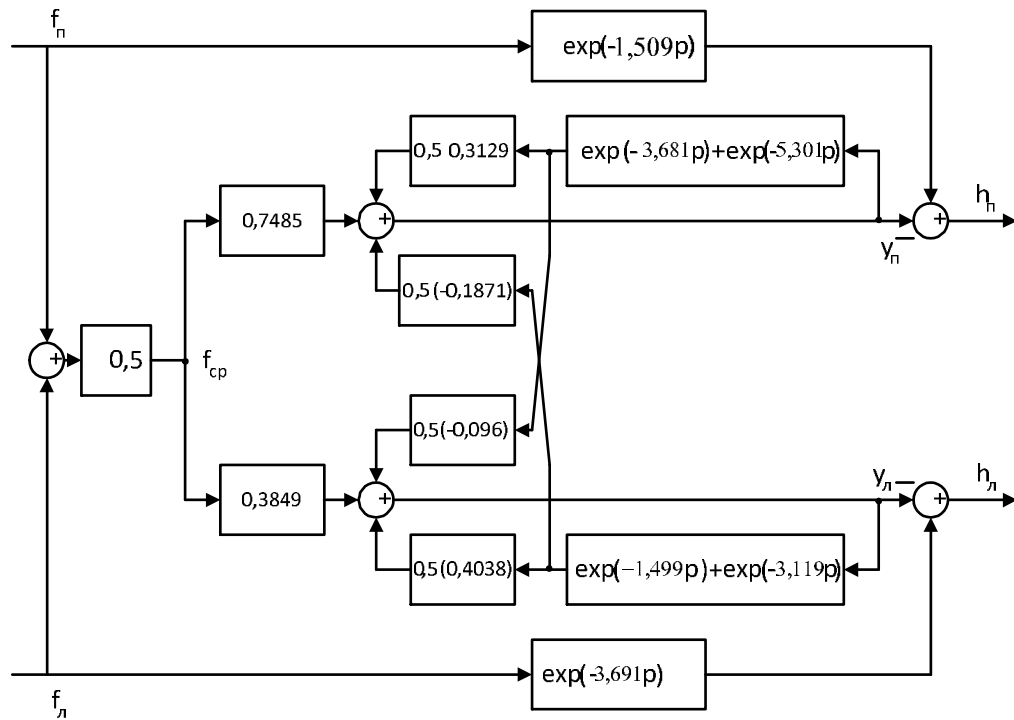


Рисунок 2.8 Функциональная схема модели зависимостей между геометрическими параметрами автогрейдера

Имитационная модель рабочего процесса автогрейдера предназначена для моделирования как процесса копания и профилирования поверхности земляного полотна, так и перемещения грунта. Описание пространственных связей между положениями базовой машины и рабочего органа позволяет определить влияние выноса отвала на среднюю глубину резания грунта. При асимметричном выносе отвала средняя глубина резания грунта

$$h_{cp} = h_n + (h_l - h_n) \left(0,5 - \frac{L_{\text{вын}}}{G} \right). \quad (2.10)$$

Таким образом, в модели учтены геометрические параметры автогрейдера ДЗ-98.

2.2.6 Модель формирования призмы волочения

Случайная сила сопротивления копанию грунта зависит от двух факторов: случайное изменение глубины резания грунта и сопротивление перемещению грунта. В настоящей работе модернизирована динамическая модель формирова-

ния призмы волочения, описывающая зависимость объема призмы V_{np} от переменной глубины резания грунта h и переменной скорости v движения ЗТМ. В качестве модели, описывающей траекторию движения частиц грунта в призме волочения автогрейдера, использована модель, описанная в работе [58]. Движение отвала рассматривается в его проекции на горизонтальную плоскость.

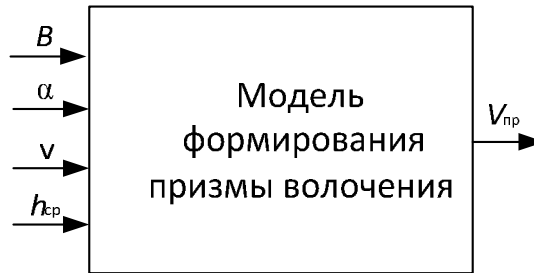


Рисунок 2.9 – Функциональная схема расчета объема призмы волочения

Входами модели являются: ширина отвала B , угол захвата α , действительная скорость автогрейдера v , глубина резания грунта h . Выходом модели является объем призмы волочения V_{np} .

Процесс формирования призмы волочения разобьем на две части: накопление на отвале вырезаемого грунта и сход грунта с отвала.

$$\begin{aligned} V_{np}(t) &= V^{нак}(t) - V^{схода}(t) = \\ &= B \cdot \sin \alpha \cdot v(t) \cdot h(t) - B \cdot \sin \alpha \cdot v(t) \cdot h(t) \cdot e^{-pT}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

где e^{-pT} обозначает запаздывание на время T ;

$p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования.

Объем грунта, накапливаемого на отвале, определяется путем интегрирования (2.11) по времени. Имитационная модель Simulink приведена на рисунке 2.19. Данная динамическая подсистема Prism Volume содержит параметры рабочего процесса тяжелого автогрейдера.

2.2.7 Модель формирования силы сопротивлению копанию

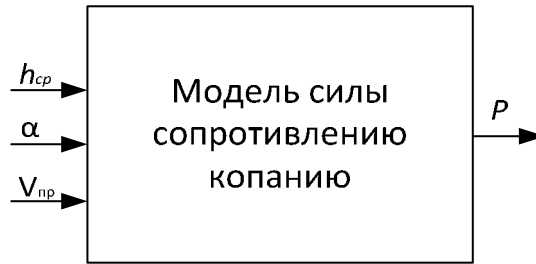


Рисунок 2.10 – Функциональная схема расчета силы сопротивлению копанию

При формировании случайной силы сопротивления копанию выделены две составляющие [30, 589, 112]: тренд силы сопротивления P_m , зависящий от глубины резания грунта и сопротивления перемещению призмы волочения, и нормализованные случайные флуктуации P_ϕ , вызванные неоднородностью грунта. Сила сопротивления копанию формируется следующим образом:

$$P_m = P_m(1 + P_\phi). \quad (2.12)$$

Тренд силы сопротивления складывается из сил сопротивления резанию грунта и перемещению призмы волочения:

$$P_m(t) = P_{рез}(t) + P_{пр}(t). \quad (2.13)$$

Сила сопротивления резанию грунта моделируется выражением [11, 84]

$$P_{рез} = KBh \sin \alpha, \quad (2.14)$$

где K – удельное сопротивление резанию грунта;

B – длина отвала;

α – угол захвата.

От глубины резания грунта h также зависит объем призмы волочения $V_{пр}$. Динамическая модель формирования призмы волочения приведена выше. Сопротивление перемещению призмы волочения [11, 84]:

$$P_{пр} = P_n + P_c + P_\phi, \quad (2.15)$$

где P_n – сопротивление поступательному перемещению призмы перед отвалом;

P_c – сопротивление трения призмы волочения при ее перемещении вдоль отвала;

P_g – сопротивление грунта при движении его вверх по отвалу.

$$P_n = V_{np} \lambda f_{cp} \sin \alpha, \quad (2.16)$$

где λ – насыпной вес призмы волочения;

f_{cp} – коэффициент внутреннего трения грунта.

$$P_c = V_{np} \lambda f_{cp} f_1 \cos \alpha, \quad (2.17)$$

где f_1 – коэффициент трения грунта об отвал.

$$P_g = V_{np} \lambda \cos^2 \gamma f_1 \sin \alpha, \quad (2.18)$$

где γ – угол резания ножа.

Сила тяги автогрейдера без учета ускорения машины равна сумме сил сопротивления на рабочем органе и сопротивления перекачиванию машины P_f [107]:

$$T = P + P_f. \quad (2.19)$$

От силы тяги и силового радиуса колесных движителей r_c зависит момент сопротивления, приведенный к движителю [106]:

$$M_k = Tr_c. \quad (2.20)$$

2.3 Модель привода автогрейдера

Случайный момент сопротивления на колесных движителях влияет на режим работы двигателя автогрейдера, угловую скорость вала двигателя, буксование движителей и скорость движения машины. В имитационной модели тягового режима необходимо учитывать динамические характеристики привода автогрейдера для оценки производительности и топливной экономичности.

Известна одномассовая модель ЗТМ [30], описывающая зависимость скорости вращения колесных движителей от момента сопротивления. Модель представлена в виде передаточной функции с переменными параметрами и учитывает изменяющуюся инерционность привода ЗТМ в зависимости от выбранных рабочих точек на регуляторной характеристике двигателя и кривой буксования. Недостатком модели является необходимость линеаризации характеристик в каждой

рабочей точке, что затрудняет моделирование нелинейных зависимостей между показателями тягового режима в динамике.

В настоящей работе предложена модель привода автогрейдера [61], основанная на численном решении систем нелинейных уравнений, что позволяет использовать нелинейные регуляторные характеристики двигателя и значения коэффициента буксования, заданные таблично (например, на основе экспериментальных данных).

2.3.1 Уравнения движения элементов привода автогрейдера

Вывод уравнений движения основан на схеме, представленной на рисунке 2.11.

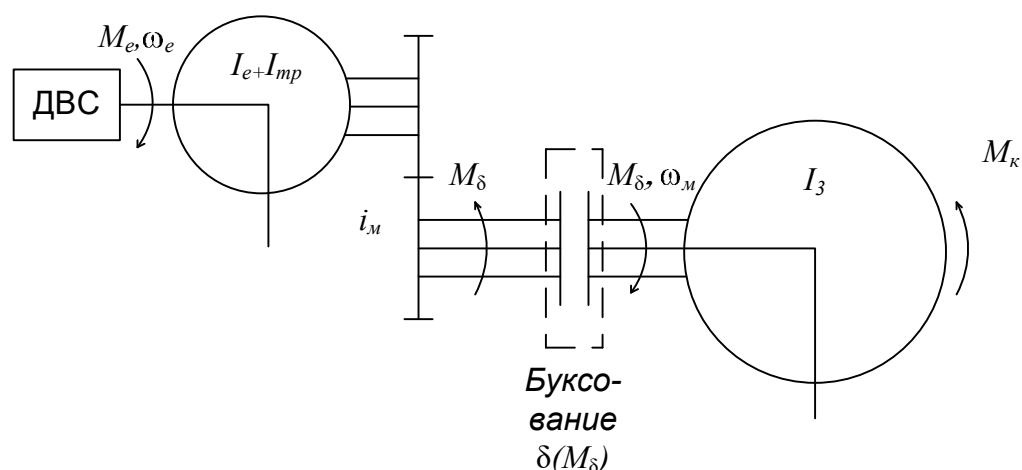


Рисунок 2.11 Двухмассовая динамическая схема привода автогрейдера с механической трансмиссией

На схеме используются следующие обозначения:

M_e – крутящий момент, развиваемый двигателем, Нм;

ω_e – угловая скорость вала двигателя, с^{-1} (соответствует частоте вращения n_e);

M_k – момент сопротивления, обусловленный внешними нагрузками и приведенный к движителю, Нм;

M_{δ} – момент сцепления движителей с грунтом, Нм;

ω_m – угловая скорость ведомых колес (при условии выключенного переднего моста), характеризующая действительную скорость автогрейдера, c^{-1} ;

I_e - момент инерции двигателя;

I_{mp} - момент инерции трансмиссии и движителей, приведенный к валу двигателя;

I_3 - момент инерции поступательно движущихся частей автогрейдера с призмой волочения, приведенный к движителю;

i_m - передаточное число трансмиссии.

Маховики с моментами инерции I_e , I_{mp} , I_3 заменяют реальные вращающиеся массы двигателя, трансмиссии и поступательно движущиеся массы машины с призмой волочения соответственно.

Составим дифференциальные уравнения движения элементов привода. Приведем момент сцепления движителей с грунтом к валу двигателя, запишем уравнение равновесия моментов с учетом инерционности двигателя и трансмиссии:

$$M_e(\omega_e) - \frac{M_{\delta}}{i_m \eta_m} - (I_e + I_{mp}) \frac{d\omega_e}{dt} = 0, \quad (2.21)$$

где $M_e(\omega_e)$ – зависимость крутящего момента, развиваемого двигателем, от угловой скорости вала двигателя;

η_m – КПД механической трансмиссии.

Зависимость $M_e(\omega_e)$ задается таблично (регуляторная характеристика двигателя), промежуточные значения рассчитываются одномерной табличной интерполяцией.

Динамика движителей (момент сцепления движителей с грунтом) с учетом инерционности машины описывается уравнением:

$$M_{\delta} - M_k = I_3 \frac{d\omega_m}{dt}. \quad (2.22)$$

Отсюда получим угловое ускорение движителей:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{M_{\delta} - M_k}{I_3}. \quad (2.23)$$

С учетом буксования угловая скорость ведомых колес равна

$$\omega_m = \omega_e \cdot \frac{1 - \delta(M_\delta)}{i_m} \quad (2.24)$$

где $\delta(M_\delta)$ – зависимость коэффициента буксования от момента сцепления на двигателе. Зависимость задается таблично, промежуточные значения рассчитываются одномерной табличной интерполяцией.

При расчете углового ускорения вала двигателя используем численное дифференцирование:

$$\frac{d\omega_e}{dt} = \frac{(\omega_e(t) - \omega_e(t - \Delta t))}{\Delta t} \quad (2.25)$$

где Δt – шаг по времени при решении дифференциального уравнения;

$\omega_e(t)$ – значение угловой скорости вала двигателя в текущий момент времени;

$\omega_e(t - \Delta t)$ – значение угловой скорости вала двигателя в предыдущий момент времени.

Из уравнения (2.23) с помощью численного дифференцирования получим угловое ускорение ведомых движителей:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{i_m} \cdot \frac{\omega_e(t) \cdot (1 - \delta(t)) - \omega_e(t - \Delta t) \cdot (1 - \delta(t - \Delta t))}{\Delta t} = 0, \quad (2.26)$$

где $\delta(t)$ – значение коэффициента буксования в текущий момент времени;

$\delta(t - \Delta t)$ – значение коэффициента буксования в предыдущий момент времени.

Из уравнений (2.23) и (2.25) получим

$$\frac{M_\delta - M_\kappa}{I_3} - \frac{1}{i_m} \cdot \frac{\omega_e(t) \cdot (1 - \delta(t)) - \omega_e(t - \Delta t) \cdot (1 - \delta(t - \Delta t))}{\Delta t} = 0, \quad (2.27)$$

Составим систему нелинейных алгебраических уравнений $F(X)=0$ относительно переменных $X = \left(M_\delta, \frac{d\omega_e}{dt}, M_e \right)$:

$$\begin{cases} M_e - \frac{M_\delta}{i_{mp} \eta_m} - (I_e + I_{mp}) \frac{d\omega_e}{dt} = 0 \\ \frac{d\omega_e}{dt} - \frac{(\omega_e(t) - \omega_e(t - \Delta t))}{\Delta t} = 0 \\ \frac{M_\delta - M_\kappa}{I_3} - \frac{1}{i_m} \cdot \frac{\omega_e(t) \cdot (1 - \delta(t)) - \omega_e(t - \Delta t) \cdot (1 - \delta(t - \Delta t))}{\Delta t} = 0 \end{cases} \quad (2.28)$$

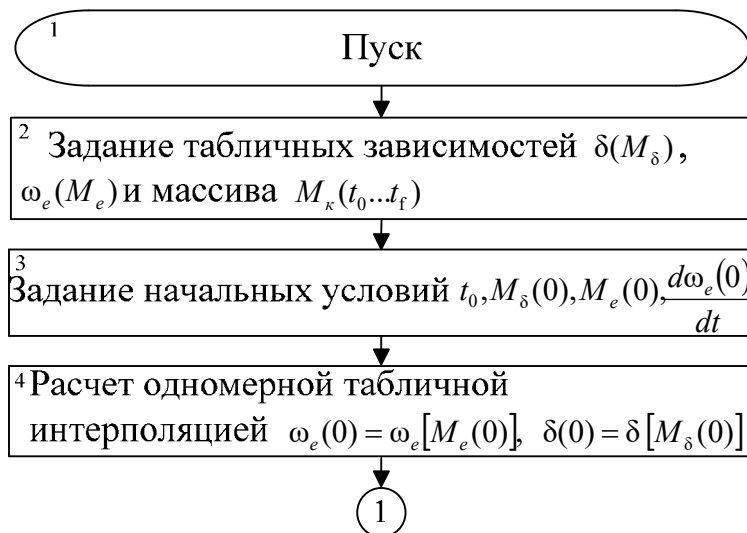
Система дифференциальных уравнений (2.28) решается относительно переменных M_δ , $\frac{d\omega_e}{dt}$, M_e при заданных текущих значениях ω_e и M_e . Численное решение реализовано в среде MATLAB с помощью программной функции `fsolve` [9].

2.3.2 Алгоритм моделирования привода автогрейдера

На каждом шаге по времени t решается система (2.28) относительно переменных X . Численное решение реализовано в среде MATLAB с помощью программной функции `fsolve` [9].

На каждом шаге по времени t осуществляется численное интегрирование углового ускорения $\frac{d\omega_e}{dt}$ в модели Simulink [117].

В настоящей работе предлагается алгоритм моделирования привода автогрейдера с механической трансмиссией. Схема алгоритма представлена на рисунке 2.12.



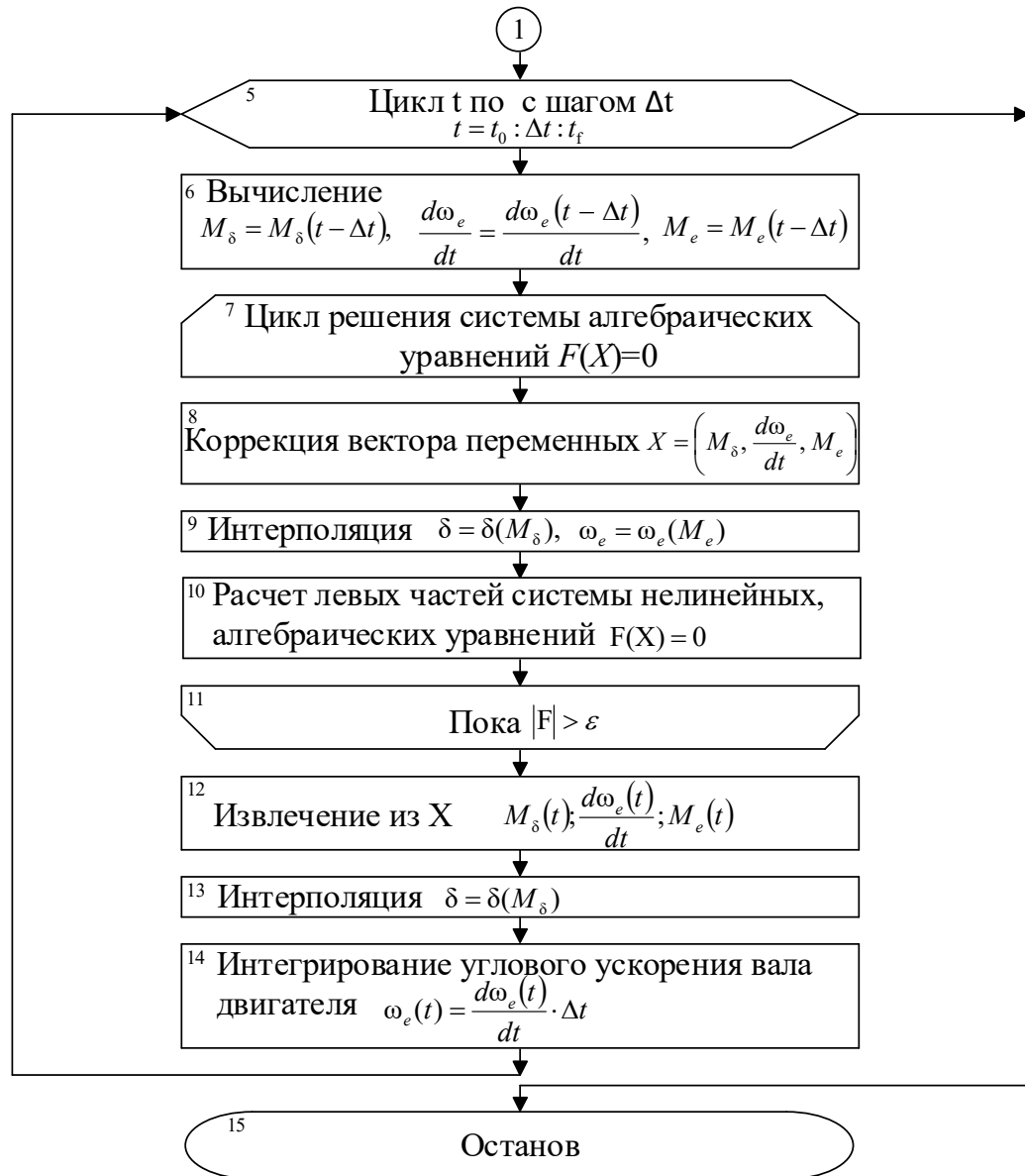


Рисунок 2.12. Схема алгоритма моделирования привода автогрейдера

В блоках 2 и 3 формируются исходные данные для расчета и задаются начальные условия, т.е. значения переменных X в момент времени $t_0 = 0$.

В блоках 4 и 9 угловая скорость и коэффициент буксования рассчитываются одномерной табличной интерполяцией на основе исходных массивов значений $M_e(\omega_e)$ и $\delta(M_\delta)$.

Поиск решения системы уравнений (2.28) для текущего момента времени выполняется в блоках 7–11 с помощью функции MATLAB `fsolve()`.

Полученная в настоящей работе модель привода автогрейдера позволяет учитывать нелинейные зависимости между параметрами машины и показателями тягового режима автогрейдера в имитационной модели MATLAB/Simulink.

2.3.3 Регрессионная модель расхода топлива

Для оценки энергоэффективности автогрейдера в модели тягового режима учтен удельный расход топлива.

При расчете удельного расхода топлива g_e использована многопараметровая характеристика двигателя [12], представляющая собой зависимости мощности двигателя N_e (кВт) и удельного эффективного расхода топлива g_e (г/кВт·ч) от двух факторов: среднего эффективного давления p_e и частоты вращения вала двигателя n_e . Графическая многопараметровая характеристика двигателя (рисунок 2.13) – это проекция значений интересующего параметра на плоскость факторов p_e и n_e .

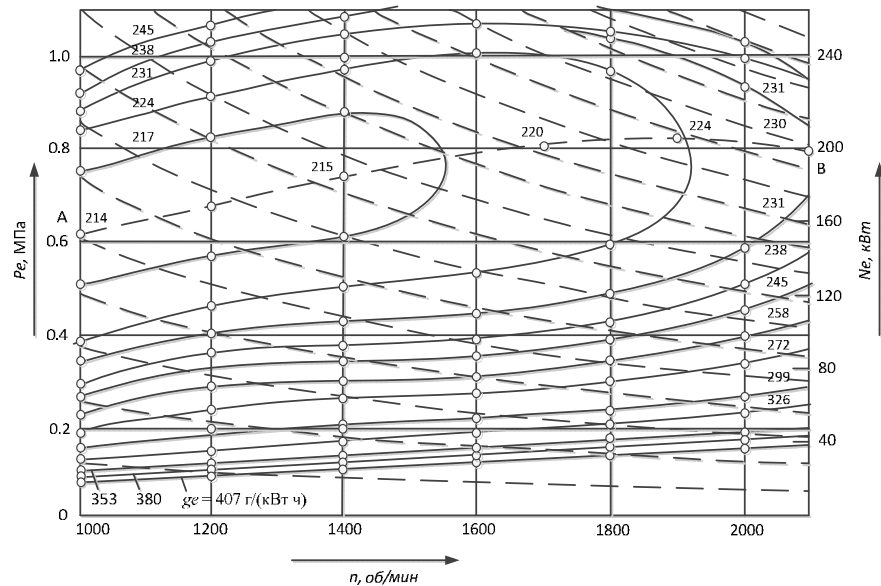


Рисунок 2.13 - Многопараметровая характеристика двигателя ЯМЗ-238Н

Для использования многопараметровой характеристики в имитационной модели необходимо получить непрерывные функциональные зависимости: $g_e = f_1(n_e, p_e)$ и $N_e = f_2(n_e, p_e)$. Массивы дискретных значений $g_e(n_e, p_e)$ и

$N_e(n_e, p_e)$ получены автором путем оцифровки исходных графических характеристик.

На рисунке 2.14 массивы оцифрованных значений показателей отмечены точками. По этим точкам в MATLAB методами подгонки кривых построены нелинейные модели множественной регрессии, соответствующие поверхностям на рисунке:

$$\hat{g}_e = f_1(n_e, p_e); \quad (2.29)$$

$$\hat{N}_e = f_2(n_e, p_e). \quad (2.30)$$

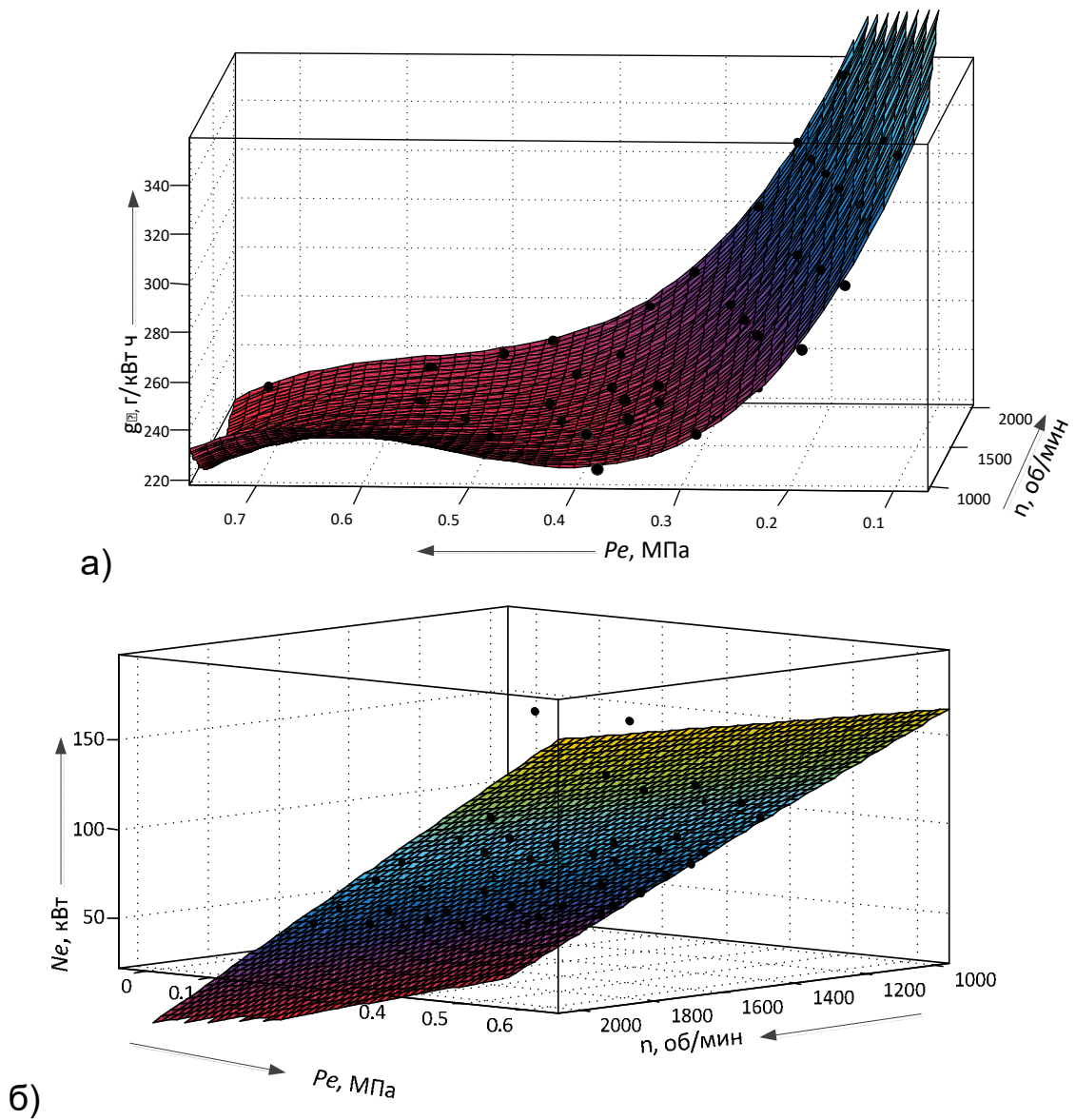


Рисунок 2.14 – Аппроксимация многопараметровой характеристики: а) модель удельного расхода топлива; б) модель мощности двигателя.

Для подбора вида функций f_1, f_2 и значений параметров моделей использован пакет расширения MATLAB Curve Fitting Toolbox. В результате выбраны двухфакторные полиномиальные модели третьего и второго порядков.

В результате аппроксимации получены параметры уравнений регрессии:

$$\begin{aligned} \widehat{g_e} = & 302,4 + 0,1792 \cdot n_e - 914,7 \cdot p_e - 1,52 \cdot 10^{-5} \cdot n_e^2 - \\ & - 0,6436 \cdot n_e \cdot p_e + 2658 \cdot p_e^2 + 9,368 \cdot 10^{-5} \cdot n_e^2 \cdot p_e + \\ & + 0,2222 \cdot n_e \cdot p_e^2 - 1794 \cdot p_e^3. \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\widehat{N_e} = 9,08 - 0,009146 \cdot n_e + 229,4 \cdot p_e + 0,02916 \cdot n_e \cdot p_e - 7,241 \cdot p_e^2. \quad (2.32)$$

Коэффициенты детерминации равны соответственно $R^2 = 0,984$ и $R^2 = 0,987$, что говорит о хорошей точности моделей.

Для использования регрессионных моделей в общей имитационной модели тягового режима автогрейдера использованы следующие зависимости между показателями. Эффективное давление p_e и крутящий момент двигателя M_e связаны соотношением: [12]

$$p_e = 0,3147 \cdot 10^4 \cdot \frac{M_e \cdot \tau}{i \cdot V_h}, \text{ Па}, \quad (2.33)$$

где τ – тактность двигателя;

V_h – рабочий объем цилиндра, л;

i – число цилиндров.

Частота связана с угловой скоростью вала двигателя:

$$n_e = \frac{\omega_e \cdot 60}{2\pi}, \text{ об/мин.} \quad (2.34)$$

Значения удельного расхода топлива g_e и мощности двигателя N_e используются в имитационной модели для определения часового расхода топлива в соответствии с (2.4) и удельного расхода топлива на единицу объема грунта в соответствии с (2.5).

2.3.4 Модель буксования движителей

Буксование автогрейдера оказывает значительное влияние на действительную скорость, тяговые характеристики, энергетический баланс и производительность [82]. Предсказание буксования в зависимости от силы тяги является важной задачей в свете построения математической модели рабочего процесса автогрейдера. При отсутствии информации о динамике коэффициента буксования в модели тягового режима используется полиномиальная аппроксимация статической зависимости коэффициента буксования от силы тяги.

Информация о тягово-цепных свойствах автогрейдера, как правило, представлена экспериментально полученными статическими зависимостями коэффициента буксования δ от силы тяги T , на которых показано усредненное значение δ для измеренных значений T [37]:

$$\delta = A \left(\frac{T}{R} \right) + B \left(\frac{T}{R} \right)^n, \quad (2.35)$$

где A и B – табличные коэффициенты для различных типов грунтов;
 R – вертикальная реакция, действующая на шину со стороны грунта;
 $n \in \{4; 5; 6; 8\}$.

Альтернативным подходом к определению аналитического выражения буксования является полиномиальная аппроксимация $\delta(T)$ [31]. В качестве критерия качества аппроксимации был выбран коэффициент детерминации R^2 , показывающий долю вариаций коэффициента буксования δ , описываемых моделью. Полиномиальные модели, например (2.31), дают возможность предсказания буксования δ на всем диапазоне допустимых значений силы тяги T (рисунок 2.15).

$$\delta(T) = -115,24 + 3,02 \cdot 10^{-3} T - 2,01 \cdot 10^{-8} T^2 + 8,09 \cdot 10^{-14} T^3. \quad (2.36)$$

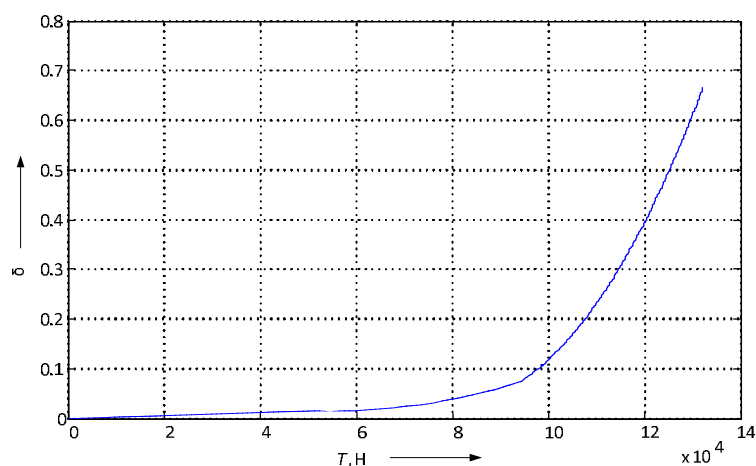


Рисунок 2.15 – Полиномиальная модель буксования

Недостатком статических моделей является то, что они не всегда адекватны реальным процессам буксования и основаны на предположении о неизменности условия контакта движителя с грунтом.

2.4 Программная реализация модели имитационной модели тягового режима

Объединение программных реализаций подсистем в имитационную модель тягового режима показано на рисунке 2.16. Модельное время изменяется с шагом 0,01 с.

Модель тягового режима включает в себя: модель формирования возмущающих воздействий от неровностей микрорельефа грунтовой поверхности (рисунок 2.17). Вместо человека-оператора, чей алгоритм управления отвалом сложно однозначно формализовать, в имитационную модель включена модель автоматического регулятора релейного типа, управляющего гидроприводом РО (рисунок 2.18). Модернизированы модели зависимостей между геометрическими параметрами автогрейдера и положением отвала (рисунки 2.19-2.20), формирования призмы волочения (рисунки 2.20-2.21), модель формирования возмущающих воздействий, вызванных неоднородностью грунта. Реализованы новые модели динамики привода автогрейдера и оценки топливной экономичности.

Имитационная модель предназначена для проведения вычислительных экспериментов. Варьируя заданное значение силы сопротивления, параметры возму-

щений, буксования, параметры регулятора и гидропривода, можно оценить влияние параметров на показатели тягового режима и критерии эффективности.

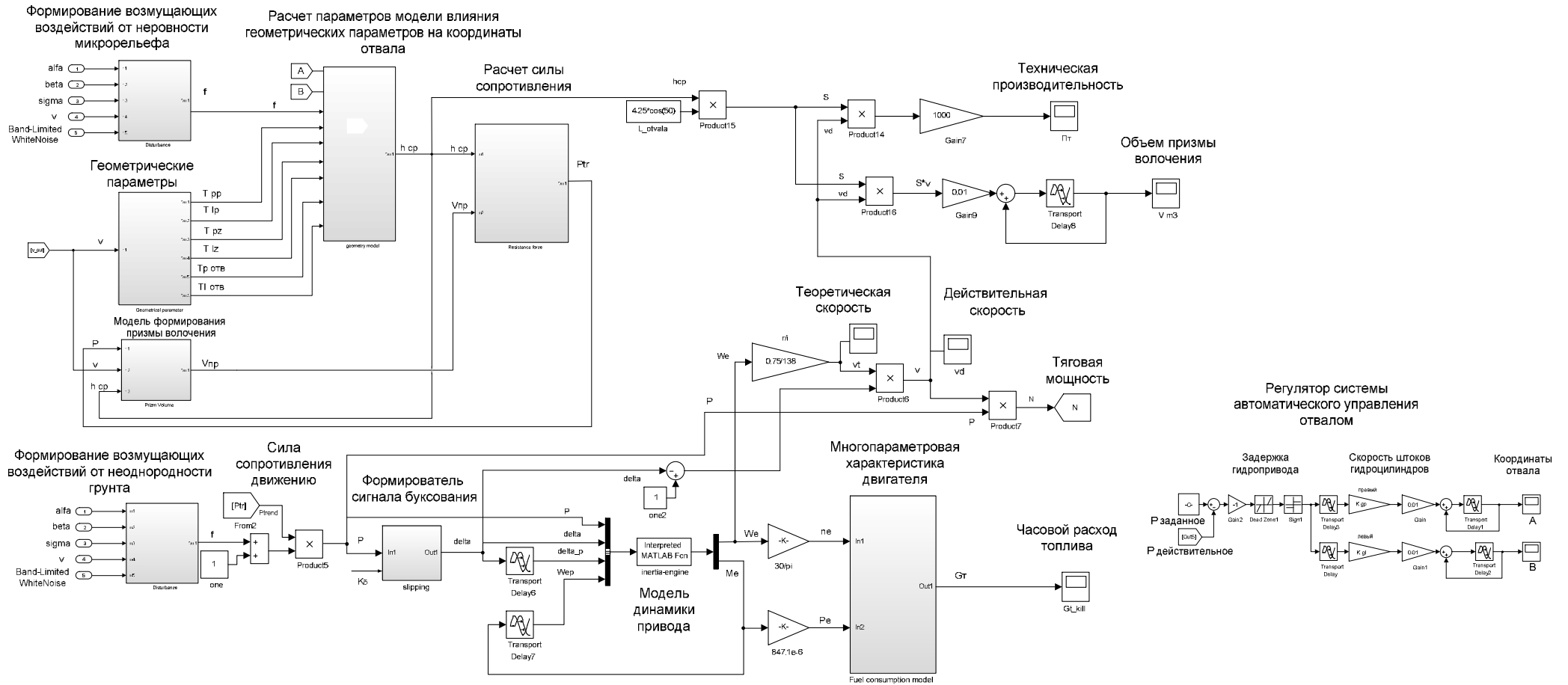


Рисунок 2.16 – Реализация имитационной модели тягового режима в MATLAB/Simulink

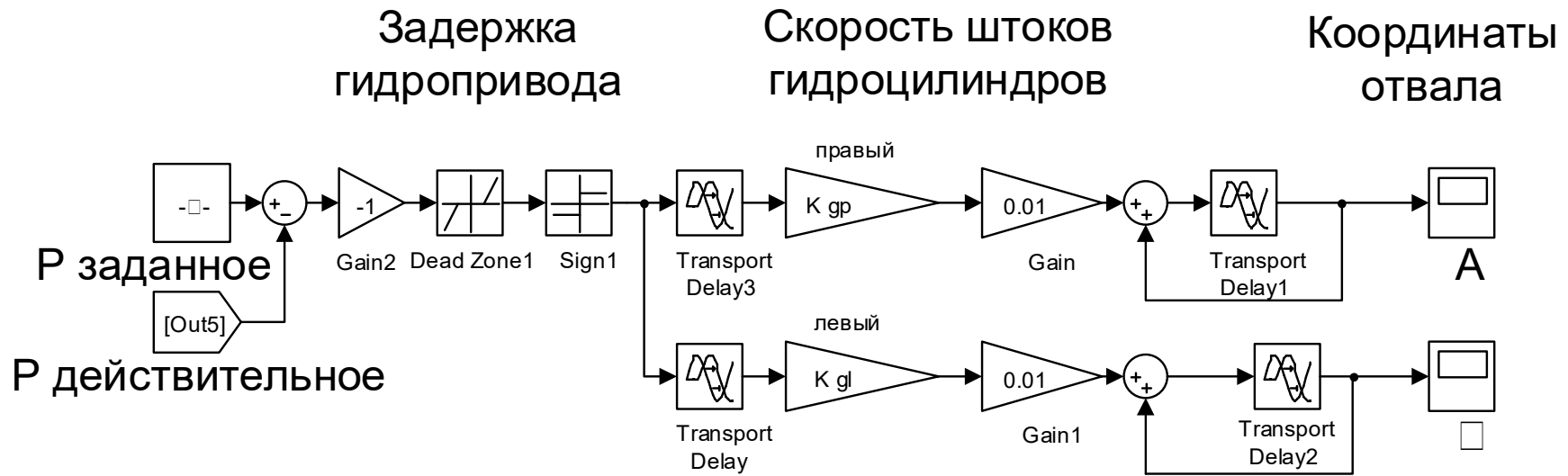


Рисунок 2.18 – Модель регулятора системы автоматического управления отвалом в MATLAB

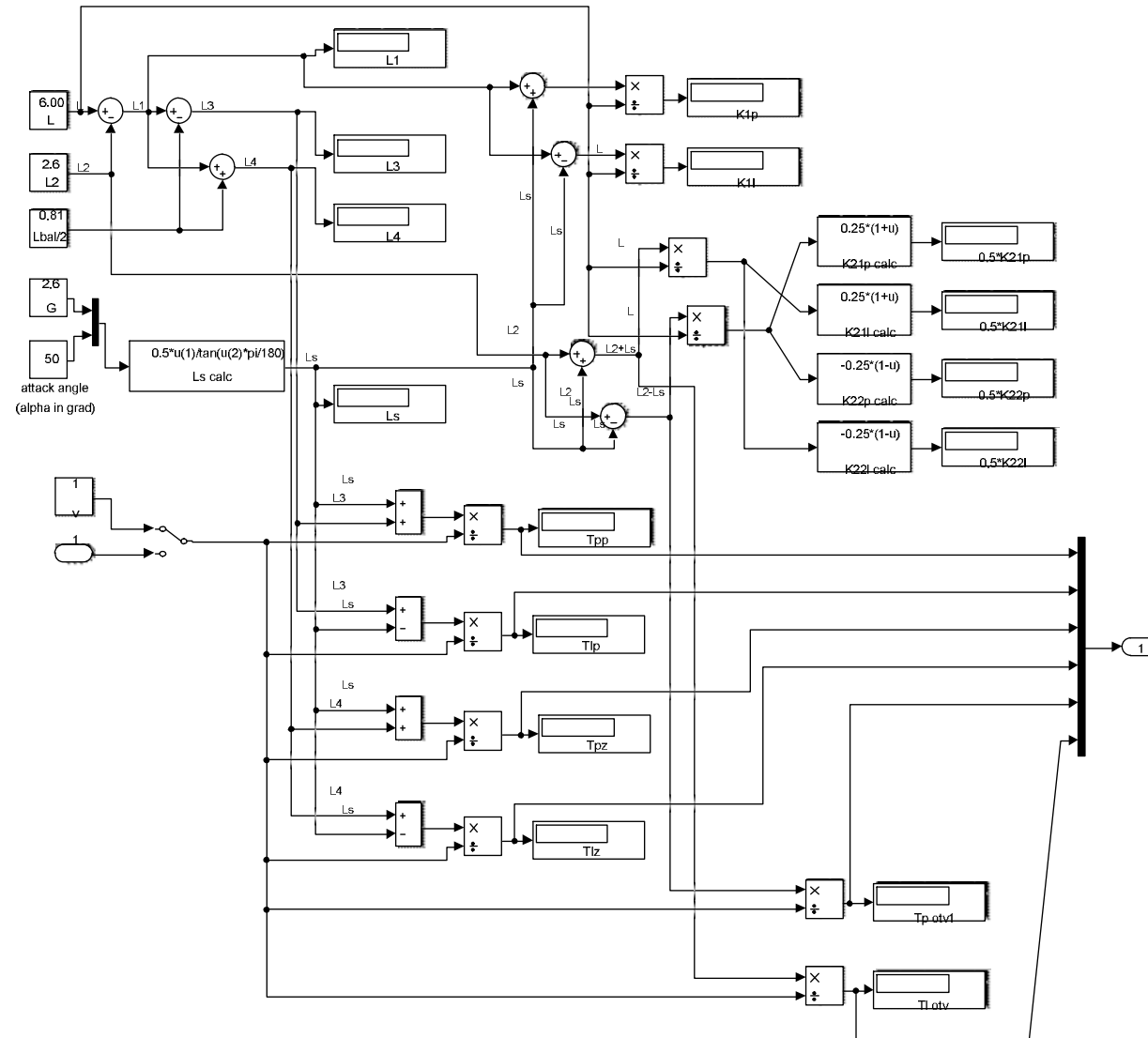


Рисунок 2.19 – Реализация подсистемы расчета геометрических параметров автогрейдера

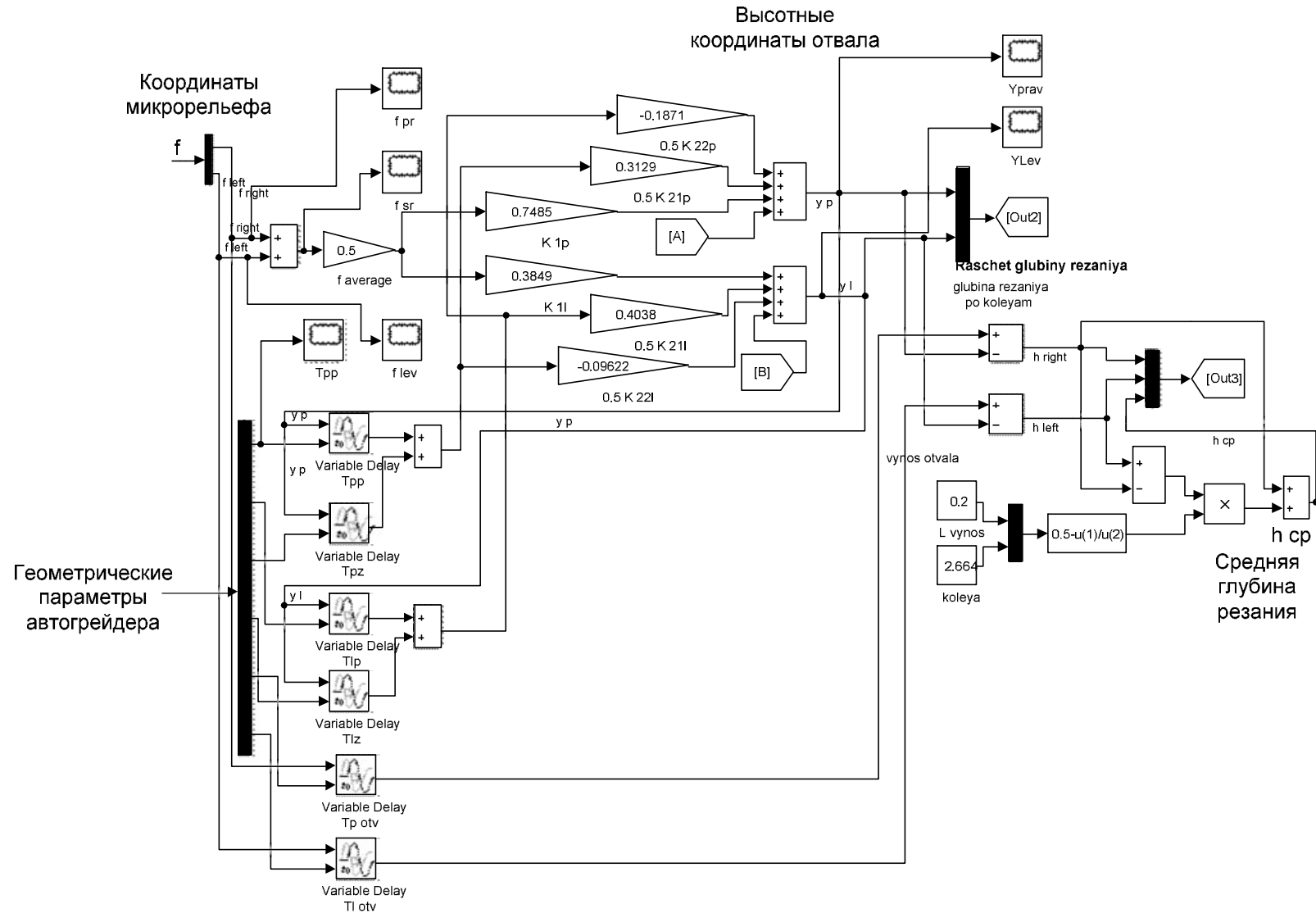


Рисунок 2.20 – Реализация подсистемы влияния геометрических параметров автогрейдера на координаты отвала

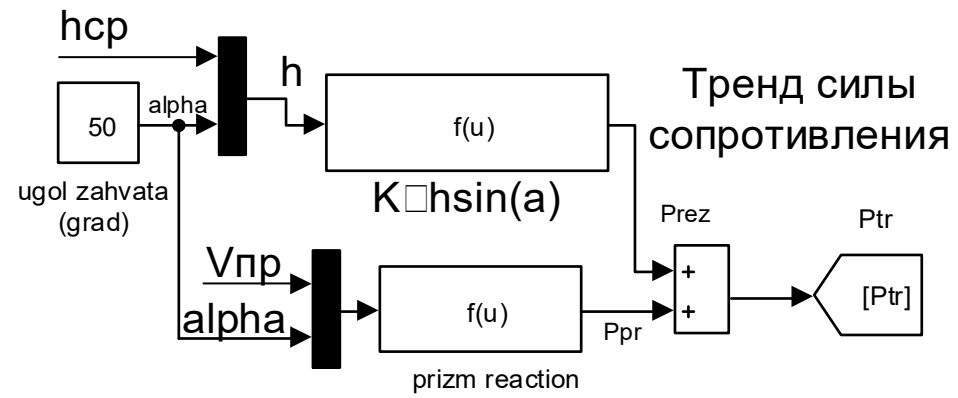


Рисунок 2.21 – Реализация подсистемы расчета силы сопротивления копанью

Выводы по главе

1. Выбраны критерии эффективности управления рабочим органом автогрейдера в тяговом режиме: удельный расхода топлива на единицу объема вырезанного грунта и техническая производительность. Приведены зависимости, связывающие критерии с показателями рабочего процесса и параметрами автогрейдера.

2. Разработана структура модели управления тяговым режимом автогрейдера. Управляемой величиной, зависящей от времени t , является сила сопротивления копанию на рабочем органе $P(t)$.

3. Для моделирования тягового режима тяжелого автогрейдера модернизированы модели следующих подсистем:

- модель формирования случайных возмущающих воздействий от микрорельефа поверхности земляного полотна и неоднородности грунта;
- модель гидропривода рабочего органа и автоматического регулятора, реализующего закон управления по отклонению;
- модель геометрии автогрейдера и позиционирования рабочего органа во время движения;
- модель формирования призмы волочения на отвале автогрейдера;
- модель формирования случайной силы сопротивления на рабочем органе автогрейдера;
- модель буксования движителей.

4. На основе двухмассовой расчетной схемы разработана новая модель динамики привода автогрейдера. Численное решение системы нелинейных уравнений позволяет использовать нелинейные регуляторные характеристики двигателя и значения коэффициента буксования, заданные таблично (например, на основе экспериментальных данных).

5. Для оценки топливной экономичности получены новые двухфакторные регрессионные модели, аппроксимирующие оцифрованную многопараметровую характеристику двигателя. Регрессионные модели позволяют использовать зависимости удельного расхода топлива и мощности двигателя от крутящего момента

и угловой скорости. Точность моделей регрессии оценена с помощью критерия детерминации.

6. Выполнена программная реализация имитационной модели тягового режима тяжелого автогрейдера, предназначенная для проведения вычислительных экспериментов и получения статистических характеристик показателей тягового режима. Варьируя заданное значение силы сопротивления, параметры возмущений, буксования, параметры регулятора и гидропривода, можно оценить влияние параметров на критерии эффективности и получить новые зависимости между показателями тягового режима.

7. Необходимо экспериментальное подтверждение точности новой модели привода автогрейдера и получение дополнительной информации о динамике буксования колесных движителей автогрейдера в тяговом режиме.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЯГОВОГО РЕЖИМА АВТОГРЕЙДЕРА

Целями экспериментальных исследований являются автоматизированный сбор данных о показателях рабочего процесса тяжелого автогрейдера в динамике, оценка статистических характеристик основных показателей тягового режима, подтверждение точности математической модели привода автогрейдера.

Задачи экспериментальных исследований:

- создание измерительного комплекса на основе ЭВМ, оснащение автогрейдера ДЗ-98В1 регистрирующей аппаратурой;
- проведение полевых испытаний ЗТМ;
- цифровая обработка и статистический анализ измеренных сигналов.

3.1 Объект экспериментальных исследований

В качестве объекта исследования принят тяговый режим автогрейдера тяжелого класса ДЗ-98В1 с механической трансмиссией. Выполнена регистрация следующих показателей тягового режима, изменяющихся во времени (Приложение 1):

- сила сопротивления копанию $P(t)$;
- частота вращения ведущего колеса для определения теоретической скорости машины $v_m(t)$;
- частота вращения дополнительного колеса датчика для определения действительной скорости машины $v(t)$.

На основании этих сигналов также рассчитаны коэффициент буксования и тяговая мощность.

3.2 Условия, средства и порядок проведения экспериментальных исследований

Для проведения испытаний был выбран горизонтальный прямолинейный участок грунтовой дороги длиной 200 м. Грунт II категории (супесь). Работа велась на первой передаче трансмиссии с включенным передним мостом. Выполнен рабочий проход – зарезание и перемещение грунта основным отвалом. Во время резания и перемещения грунта в реальном времени снимались показания датчиков, оцифрованные сигналы записывались в память ЭВМ. Весь процесс снимался на видеокамеру и фотоаппараты. Угол резания составлял $\beta = 40^\circ$, угол захвата $\alpha = 50^\circ$.

3.3 Состав регистрирующего оборудования

Для измерения показателей рабочего процесса на автогрейдер ДЗ-98В1 установлено регистрирующее оборудование в следующем составе.

Автогрейдер оснащен датчиками: на шкворень тяговой рамы установлены тензодатчики для измерения силы сопротивления на рабочем оборудовании; на заднем ведущем колесе установлен датчик частоты вращения; сзади машины установлен датчик действительной скорости «пятое колесо».

С целью оцифровки и записи показателей рабочего процесса в динамике автогрейдер оснащен бортовым измерительным комплексом (БИК) с модульной системой измерения на базе крейт-контроллера и персонального компьютера (изготовитель ФГУП «НАТИ», г. Москва, и ФГБОУ ВО «СибАДИ»), включающий следующие компоненты.

1. Персональный компьютер-ноутбук с программным обеспечением БИК.
2. Крейт L-Card (рисунок 3.1) с аналого-цифровыми преобразователями (АЦП):
 - 2.1. Шасси LTC-26, контроллер LC-014, блок питания на 12 В;
 - 2.2. Модуль АЦП LC-111DP (универсальный до $\pm 10\text{В}$ по 16/32 каналам).

3. Коробка коммутационная с клемными колодками DB-37F (разводка сигнальных кабелей на датчики и модули АЦП).
4. Две аккумуляторные батареи 12 В 190 Ач:
 - для питания крейта;
 - для питания ноутбука и усилителя сигнала тензодатчиков.
5. Преобразователь напряжения Porto HT-E-150 DC/AC Power Inverter 12 В/220 В.
6. Усилитель сигнала тензодатчиков 4-канальный.
7. Кабель сигнальный (экранированная витая пара, коаксиальный).
8. Датчик усилия (тензозвено, полумостовая схема подключения), предварительно проградуированный на лабораторном гидравлическом прессе (рисунок 3.2).
9. Датчик угловой скорости (рисунок 3.3) ведущего колеса автогрейдера, состоящий из зубчатого колеса и магниторезистивных переключателей 1GT101DC с элементами питания.
10. Датчик действительной скорости машины «пятое колесо» (рисунок 3.4) с формирователем импульсов на основе зубчатого колеса и датчика 1GT101DC.
11. Тележка для установки измерительной аппаратуры (рисунок 3.5).



Рисунок 3.1 Лицевая панель крейта L-CARD



Рисунок 3.2 Датчик усилия



Рисунок 3.3 Датчик угловой скорости ведущего колеса



Рисунок 3.4 «Пятое колесо» для измерения действительной скорости



Рисунок 3.5 Тележка для установки измерительной аппаратуры

Подключение датчиков к БИК и их размещение на автогрейдер выполнено согласно схеме на рисунке 3.6.

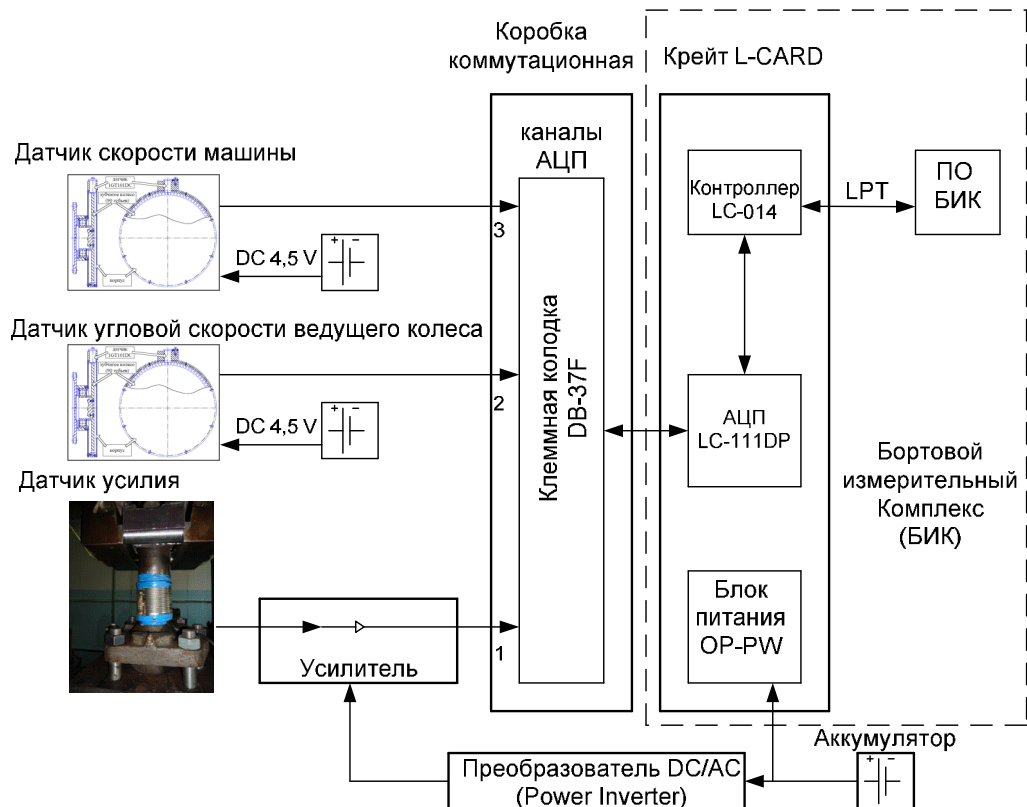


Рисунок 3.6 Схема автоматизированного сбора экспериментальных данных

3.4 Подготовка регистрирующей аппаратуры к работе

При установке измерительного комплекса на автогрейдер выполнена тарировка датчиков и проверка их работоспособности.

Выполнена настройка усилителя сигнала тензодатчиков, предназначенного для сопряжения четырех тензодатчиков с многоканальным АЦП. Усилитель обеспечивает питание полумостовой измерительной схемы тензодатчиков опорным напряжением +5 В и усиление выходного сигнала тензодатчиков с максимальным коэффициентом усиления не менее 5000. Питание усилителя осуществляется переменным напряжением 220 В с частотой 50 Гц.

Тензорезистивный датчик усилия растяжения, изготовленный специально для измерения усилия в рабочем оборудовании, предварительно испытан и тарирован (градуирован) с помощью разрывной машины ГРМ-1 (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 Тарировка датчика усилия с помощью разрывной машины ГРМ-1

Тензодатчик, подключенный к каналу усилителя, был нагружен до 9 тонн, и на усилителе отрегулирован коэффициент усиления этого канала. Затем датчик был ступенчато нагружен на разрывной машине от 0 до 7 тс с интервалом 1 тс.

Выходное напряжение канала усилителя U , соответствующее приложенной нагрузке P на датчик усилия, зарегистрировано с помощью БИК.

При тарировке на каждом шаге нагружения датчика известному значению нагрузки P_T ставится в соответствие значение напряжения усиленного сигнала U_T с тензодатчика. В результате обработки измеренных зависимостей между U_T и P_T методом наименьших параметров в MATLAB получена линейная аппроксимирующая зависимость $P(U)$ – уравнение регрессии, необходимая для пересчета электрического напряжения в значение силы растяжения (рисунок 3.8):

$$P_T = 6,2 \cdot 10^4 + 2,7 \cdot 10^4 \cdot U_T. \quad (3.1)$$

После расчета коэффициентов аппроксимирующего полинома $a = (6,2 \cdot 10^4; 2,7 \cdot 10^4)$ значение силы сопротивление копанию $P(t)$ вычисляется в MATLAB с помощью функции `polyval` согласно (3.1).

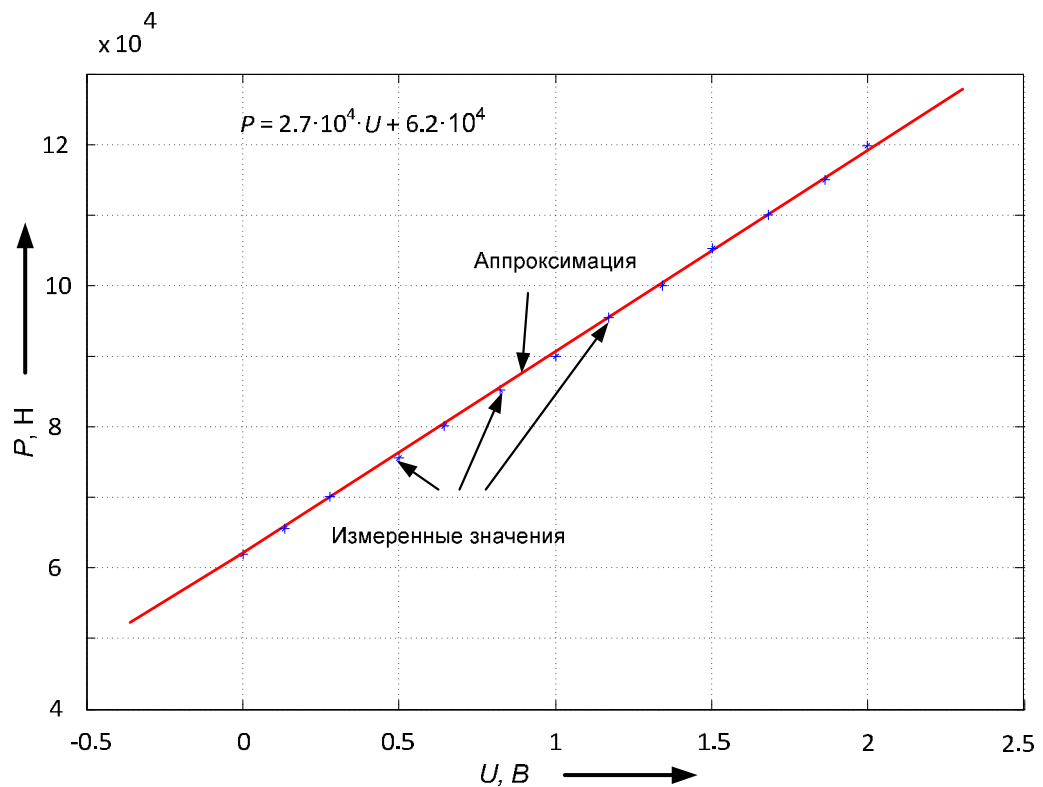


Рисунок 3.8 Тарировка датчика усилий

Измерение угловой скорости ведущего колеса и действительной скорости машины основано на применении магниторезистивных переключателя 1GT101DC. Датчик преобразует частоту вращения в последовательность импульсов, форма которых близка к прямоугольной. Частота импульсов пропорциональна частоте вращения. Диапазон питания датчика 4...24 В постоянного напряжения. Поскольку входное напряжение каналов модуля АЦП LC-111DP не более 10 В, а частотомера LC-451 – не более 5 В, для питания датчиков использованы элементы с номинальным напряжением 4,5 В. Управление модулем АЦП, автоматизированный сбор, хранение и визуализация измеренных сигналов осуществляется с помощью программного обеспечения БИК.



Рисунок 3.9 Установка датчиков



Рисунок 3.10 Установка датчиков



Рисунок 3.11 Установка датчиков

3.5 Результаты экспериментальных исследований

Полученные в ходе эксперимента первичные данные – это аналоговые электрические сигналы с датчиков. Выполнена дискретизация сигналов при помощи аналогового цифрового преобразователя (АЦП). Оцифрованные сигналы U_P (напряжение с датчика усилия), U_B (напряжение с датчика частоты вращения ведущего колеса), U_{II} (напряжение с датчика частоты вращения «пятого колеса») со-

хранены на жесткий диск ЭВМ. Задана частота дискретизации сигналов во времени 300 Гц.

Обработка полученных экспериментальных данных основана на положениях теории случайных процессов и цифровой обработки сигналов. Среда программной обработки – MATLAB [66]. В результате измерений получены следующие параметры рабочего процесса автогрейдера ДЗ-98В1:

- сила сопротивления копанию $P(t)$ (рисунок 3.12);
- теоретическая v_m и действительная v скорости машины, на основе которых определен коэффициент буксования δ .

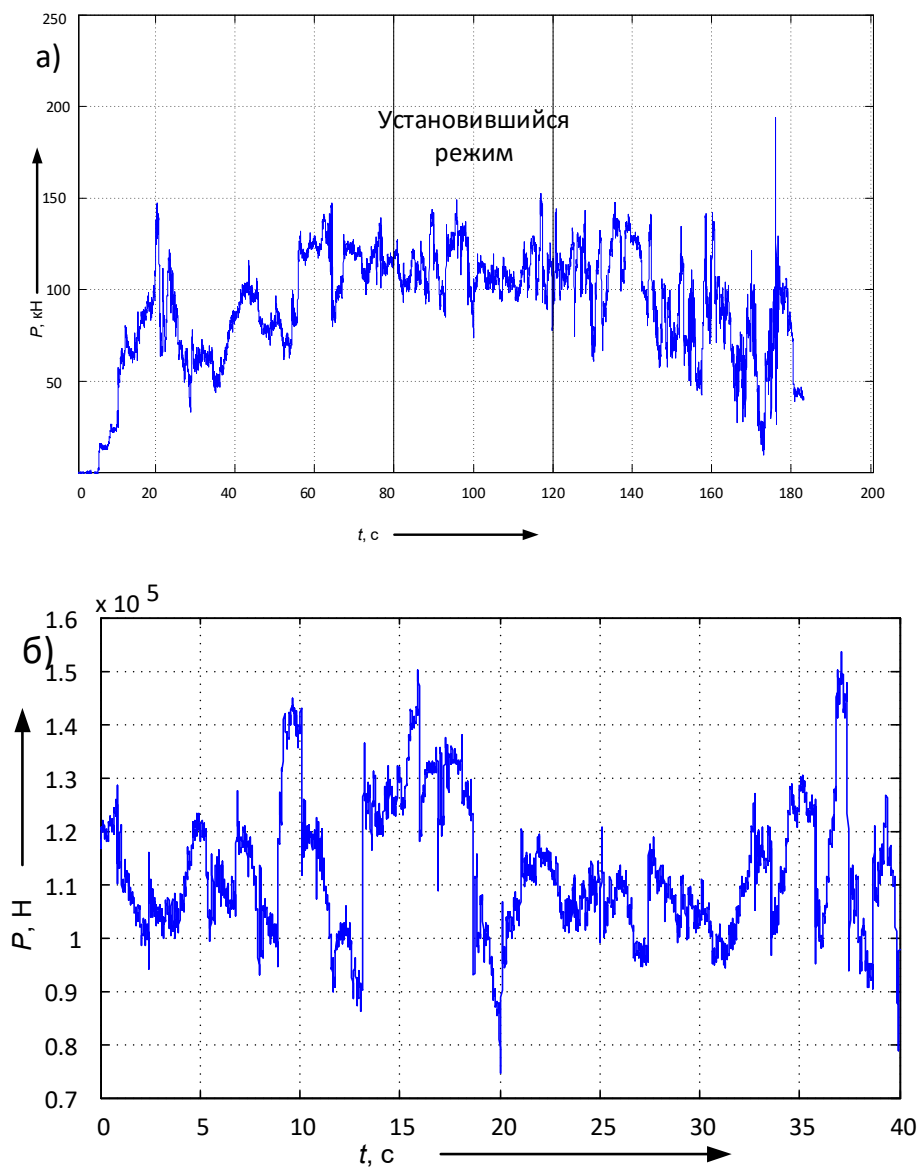


Рисунок 3.12 – Сила сопротивления копанию:
а) на всей захватке; б) в установившемся режиме

Теоретическая скорость машины получена путем обработки сигнала с датчика частоты вращения ведущего колеса – напряжения $U_B(t)$. За один оборот колеса магниторезистивный датчик формирует 90 импульсов напряжения (рисунок 3.13). По передним и задним фронтам импульсов напряжения U определены моменты времени между срабатываниями датчика 1GT101DC (рисунок 3.14). В моменты времени, соответствующие фронтам импульсов напряжений, определены мгновенные значения v_m .

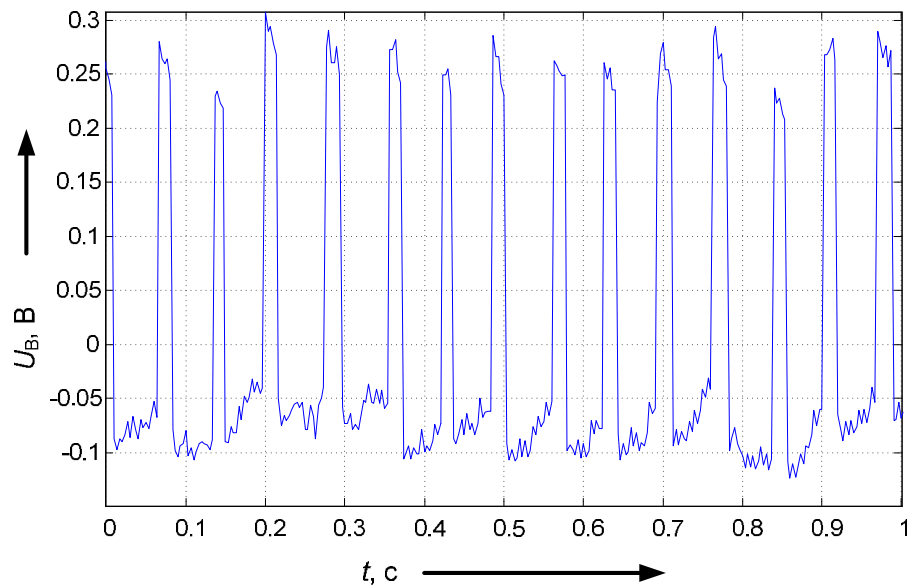


Рисунок 3.13. Напряжение с датчика угловой скорости ведущего колеса

Вычислены конечные разности между соседними отсчетами сигнала $U_B(t)$ при помощи функции MATLAB `diff()` [9]:

$$dU(i) = U_B(i) - U_B(i - 1) \quad (3.2)$$

Определяем моменты времени передних и задних фронтов импульсов сигнала $U_B(t)$ (рисунок 3.14).

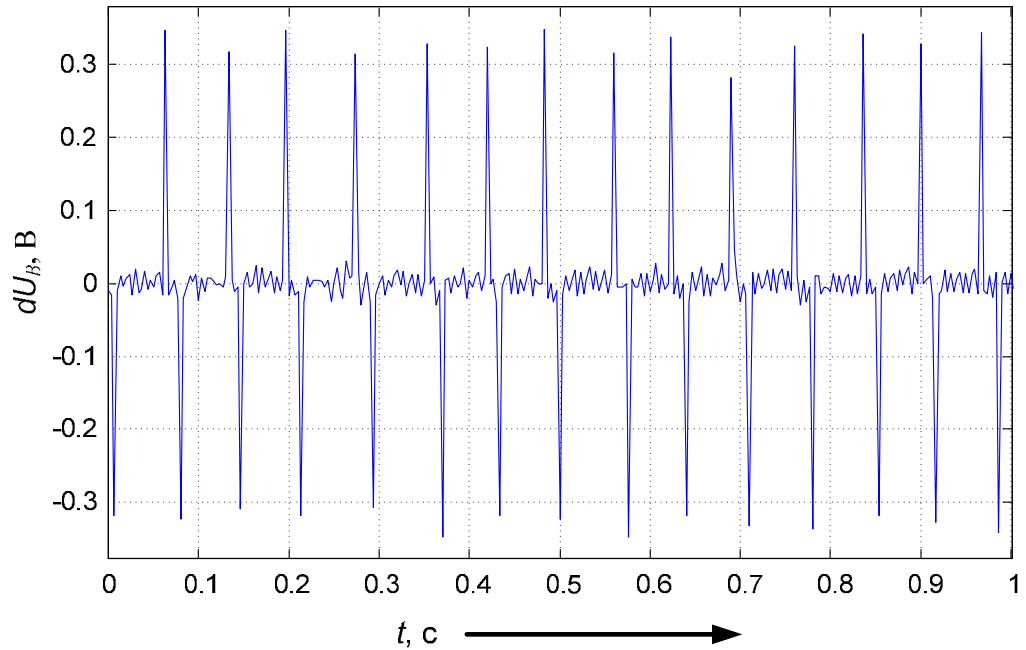


Рисунок 3.14 К определению моментов времени фронтов импульсов

Моменты передних фронтов определяются условием

$$U_B(t_B^+) > U_{nop},$$

где U_{nop} - заданное пороговое значение.

Моменты задних фронтов определяются условием

$$U_B(t_B^-) < -U_{nop}.$$

Результатом нахождения моментов времени фронтов импульсов являются массивы моментов времени t_B^+ и t_B^- .

Находим частоту оборотов ведущего колеса по интервалам времени между фронтами импульсов с датчика. Конечные разности массива моментов времени t_B :

$$dt_B(i) = t_B(i) - t_B(i - 1) \quad (3.3)$$

Частота вращения колеса (об/с)

$$f(t_B) = \frac{1}{90} \cdot \frac{1}{dt_B} \quad (3.4)$$

Информация о частотах, измеренных по передним и задним фронтам импульсов, объединена с помощью функции MATLAB unique() [116]. Получена тео-

ретическая скорость $v_m(t_B)$ как сигнал в зависимости от массива времени с неравномерным шагом t_B :

$$v_m(t_B) = 2\pi \cdot r_c \cdot f(t_B) \quad (3.5)$$

где r_c - радиус колеса.

При помощи одномерной линейной табличной интерполяции сигнала $v_m(t_B)$ определена зависимость теоретической скорости от времени с частотой 300 Гц. Интерполяция выполнена при помощи функции MATLAB `interp1()`.

При изменении частоты дискретизации в сигнале могут появиться так называемые «ложные частоты» [85]. Для их устранения полученные значения теоретической скорости пропускаем через дискретный фильтр нижних частот (ФНЧ). Используются функции MATLAB `fir1()` и `filter2()`.

Для выявления тенденций в сигнале $v_m(t)$ устранены высокочастотные колебания с помощью сглаживания сигнала простой скользящей средней при помощи функции MATLAB `smooth()` (рисунок 3.15).

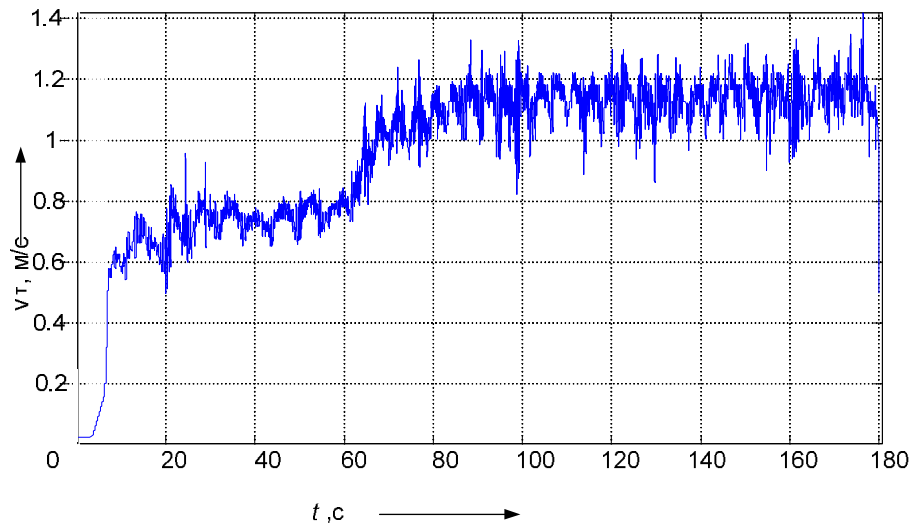


Рисунок 3.15 – Теоретическая скорость автогрейдера

Аналогично с помощью ведомого «пятого колеса» определена действительная скорость $v(t)$ автогрейдера (рисунок 3.16).

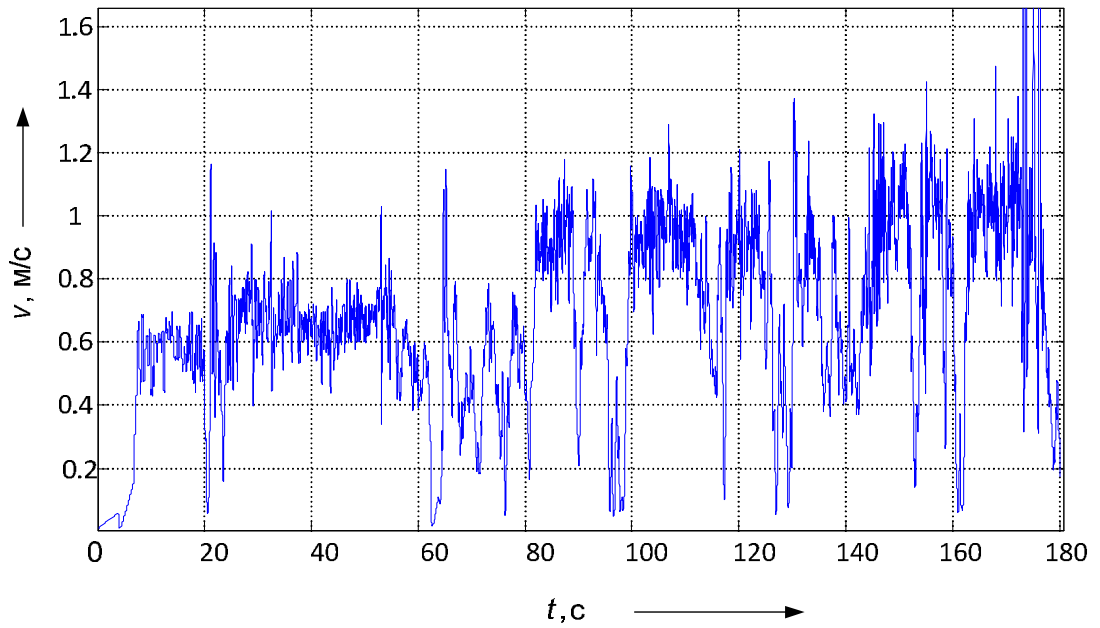


Рисунок 3.16 – Действительная скорость автогрейдера

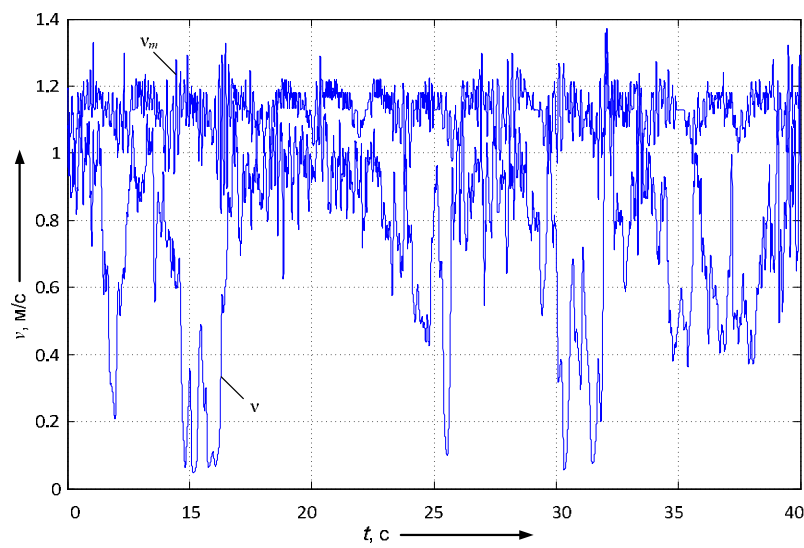


Рисунок 3.17 Действительная и теоретическая скорости автогрейдера

Рабочий процесс автогрейдера сопровождается значительными колебаниями коэффициента буксования [57]

$$\delta = \frac{v_m - v}{v_m}. \quad (3.6)$$

Коэффициент буксования рассчитан на основе теоретической и действитель-

ной скоростей автогрейдера на временном интервале 0...40 с, соответствующем установившемуся режиму (рисунок 3.18). Сглажены мелкие случайные колебания коэффициента буксования с помощью фильтра нижних частот (рисунок 3.18).

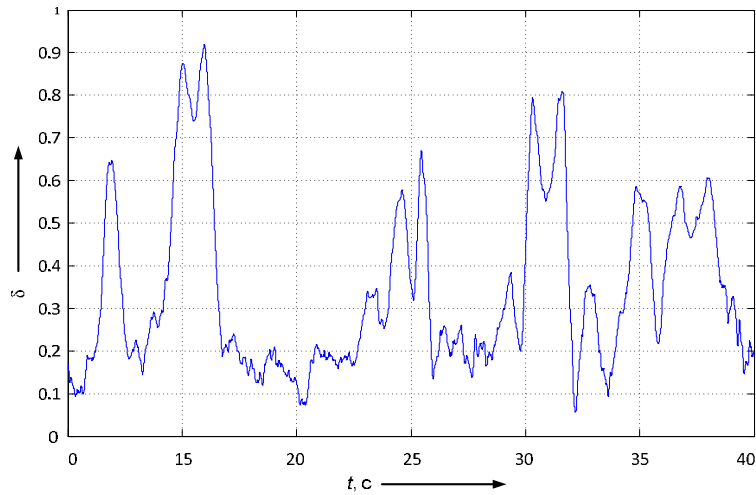


Рисунок 3.18 Коэффициент буксования

3.6 Подтверждение точности модели привода автогрейдера

Имитационная модель тягового режима предназначена для получения статистических характеристик показателей рабочего процесса: математического ожидания и среднеквадратического отклонения. Новая модель привода автогрейдера позволяет оценить влияние нагрузок на скоростной режим автогрейдера. Тяговая мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления на РО, получена как произведение силы сопротивления и действительной скорости.

С целью оценки точности математической модели тягового режима выполнено сравнение статистических характеристик экспериментальных и моделируемых значений следующих показателей: теоретическая, действительная скорость и тяговая мощность. На входе и в параметрах имитационной модели были использованы экспериментально полученные сигналы силы сопротивления и коэффициента буксования. Сравнение статистических характеристик показателей приведено в таблице 3.1.

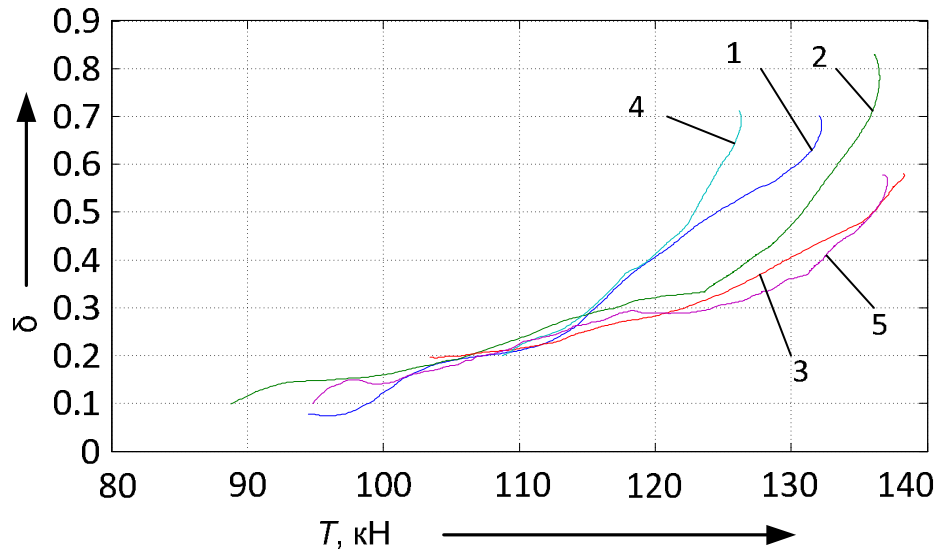


Рисунок 3.19 Экспериментальные характеристики буксования для различных грунтовых участков

Получены модели регрессии для различных участков:

$$1) \delta(T) = 0,44 - 6,41 \cdot 10^{-6} T - 6,04 \cdot 10^{-11} T^2 + 9,2 \cdot 10^{-16} T^3$$

$$2) \delta(T) = -12,14 + 3,62 \cdot 10^{-4} T - 3,56 \cdot 10^{-9} T^2 + 1,18 \cdot 10^{-14} T^3$$

$$3) \delta(T) = -7,41 + 2,08 \cdot 10^{-4} T - 1,93 \cdot 10^{-9} T^2 + 6,11 \cdot 10^{-15} T^3$$

$$4) \delta(T) = -117,24 + 3,09 \cdot 10^{-3} T - 2,74 \cdot 10^{-8} T^2 + 8,09 \cdot 10^{-14} T^3$$

$$5) \delta(T) = -19,66 + 5,22 \cdot 10^{-4} T - 4,59 \cdot 10^{-9} T^2 + 1,36 \cdot 10^{-14} T^3$$

Коэффициенты детерминации R^2 соответственно равны 0,9922, 0,9231, 0,9979, 0,9969, 0,9784, что говорит о хорошей точности моделей.

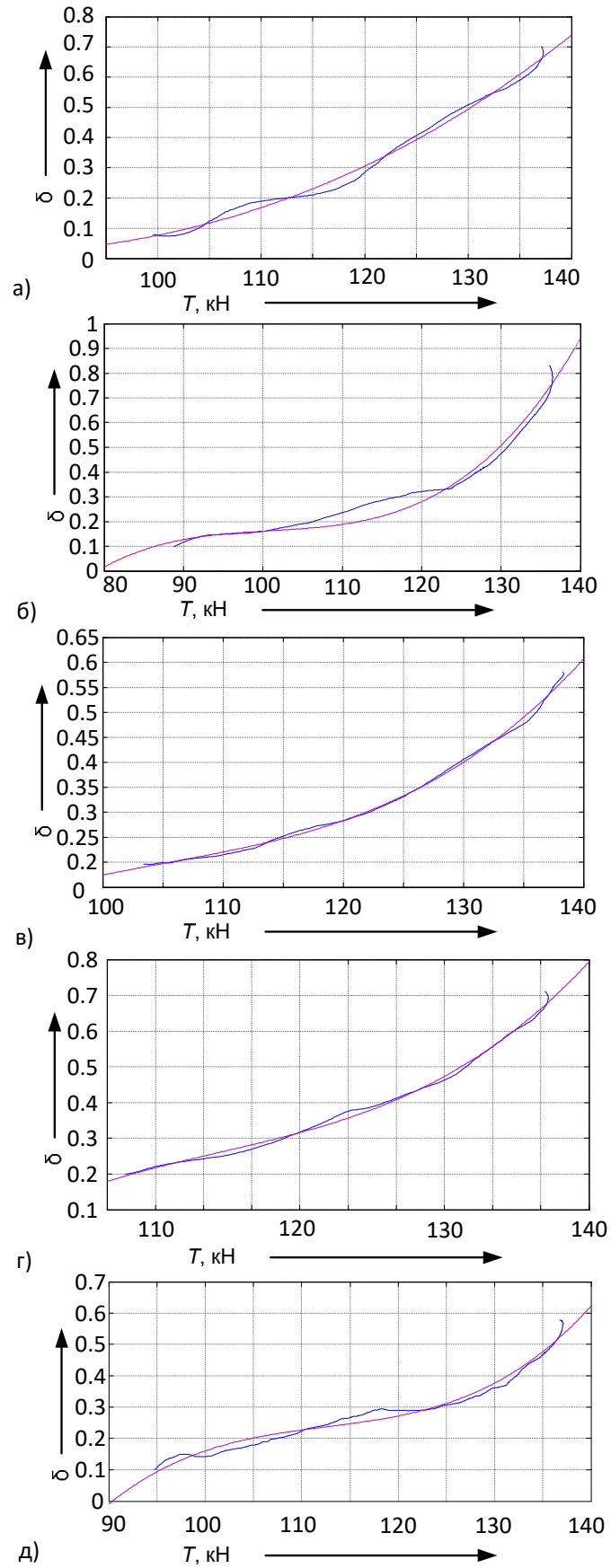


Рисунок 3.20 Кубическая аппроксимация коэффициента буксования колесного движителя

Сложность выбора отдельных участков, на которых проявляется функциональная зависимость $\delta(P)$, вызывает необходимость анализа динамики коэффициента буксования. Анализ экспериментальных значений коэффициента буксования $\delta(t)$ показал, что для всей длительности рабочего прохода автогрейдера не всегда возможно построить адекватную функциональную зависимость $\delta(P)$ из-за изменяющихся свойств опорной грунтовой поверхности.

На рисунке 3.21(a) приведен экспериментально измеренный сигнал – коэффициент буксования $\delta(t)$ движителей тяжелого автогрейдера с механической трансмиссией [66]. Длительность сигнала $T_s=40$ с соответствует длительности установившегося случайного процесса $P(t)$, близкого к стационарному с математическим ожиданием $M\{P\}=112,5$ кН и среднеквадратическим отклонением $\sigma\{P\}=12,4$ кН. На рисунке 3.21(a) видны участки, на которых резкое возрастание $\delta(t)$ не вызвано возрастанием $P(t)$ и не соответствует функциональной зависимости $\delta(P)$.

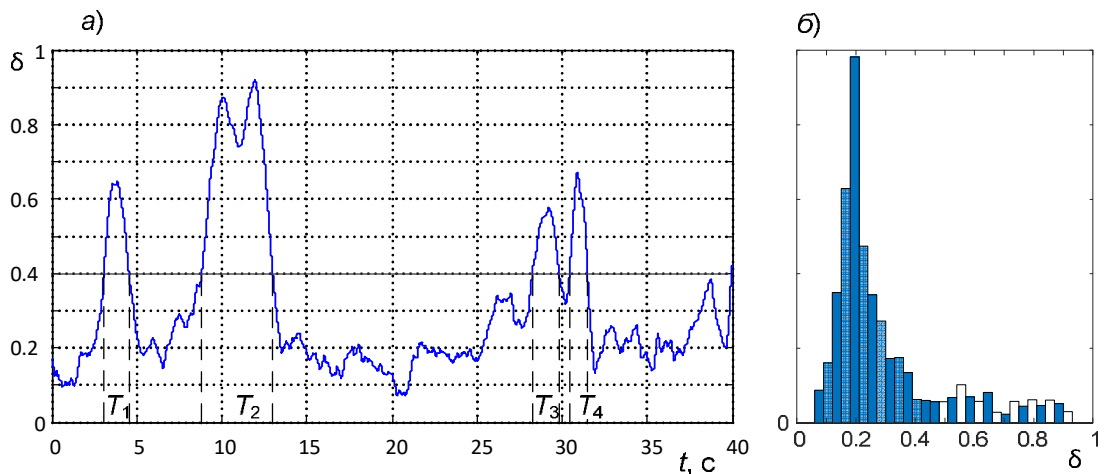


Рисунок 3.21 – Анализ коэффициента буксования

Анализ гистограммы частот на рисунке 3.21(б) показывает, что большинство наблюдений δ попадает в диапазон $0,075 < \delta < 0,4$, и наибольшее значение частот находится вблизи $\delta=0,2$, что согласуется с положениями теории колесных ЗТМ [106]. Поэтому значения $\delta > 0,4$ для исследуемого режима соответствуют повышенному буксованию. На рисунке 3.21a в интервалах времени T_1 , T_2 , T_3 и T_4 на-

блюдается повышение буксования δ и падение действительной скорости машины v .

Во время движения встречаются участки грунтовой поверхности, на которых движители «срываются» в режим повышенного буксования при относительно небольших значениях $P(t)$. Доля таких участков в общей длительности рабочих проходов влияет на скорость и производительность автогрейдера. В настоящей работе предложено учитывать это явление с помощью введенного показателя рабочего процесса «доля времени повышенного буксования» [62]:

$$K_{\delta} = (\sum_i T_i) / T_s; \quad 0 \leq K_{\delta} \leq 1. \quad (3.7)$$

Эта характеристика будет использована в имитационной модели тягового режима для генерации сигнала коэффициента буксования при моделировании ситуаций периодического перехода движителей в режим повышенного буксования.

3.8 Выводы по главе

1. Выполнен автоматизированный сбор экспериментальных данных о показателях рабочего процесса тяжелого автогрейдера ДЗ-98В1 в динамике в ходе проведения полевых испытаний с помощью бортового измерительного комплекса (БИК).

2. Для преобразования аналоговых электрических сигналов с датчиков проведена цифровая обработка и статистический анализ измеренных сигналов. Все сигналы приведены к одной частоте дискретизации, устранены случайные высокочастотные колебания и ложные частоты. Получены показатели тягового режима: сила сопротивления копанию P , теоретическая скорость машины v_m , действительная скорость машины v , коэффициент буксования колесных движителей δ , тяговая мощность автогрейдера N .

3. Методическое обеспечение настройки БИК, включая процедуру тарировки датчика усилия рабочего органа автогрейдера, и методика цифровой обработки информации об экспериментально полученных показателях тягового режима внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «СибАДИ» (Приложение 2).

4. Получены статистические характеристики показателей тягового режима, выполнено их сравнение с результатами моделирования. Расхождения математического ожидания и среднеквадратического отклонения показателей тягового режима, полученных экспериментально и на модели, не превышают 15%, что показывает приемлемую точность модели тягового режима.

5. Получены аппроксимации экспериментальных зависимостей коэффициента буксования от силы тяги в виде полиномов третьей степени.

6. Произведен анализ зависимости коэффициента буксования от времени. Выявлены интервалы времени, на которых происходит резкое возрастание $\delta(t)$. При помощи гистограммы частот выявлены значения, соответствующие повышенному буксованию. Большинство наблюдений δ попадает в диапазон $0,075 < \delta < 0,4$, и наибольшее значение частот находится вблизи $\delta = 0,2$.

7. Участки грунтовой поверхности, на которых движители «срываются» в режим повышенного буксования при относительно небольших значениях $P(t)$, предлагается учитывать с помощью введенного показателя рабочего процесса «доля времени повышенного буксования» K_{δ} .

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ РЕЖИМОМ АВТОГРЕЙДЕРА

Разработанная имитационная модель тягового режима автогрейдера позволяет исследовать множество случайных реализаций процесса и получить статистические характеристики показателей тягового режима. При проведении вычислительного эксперимента необходимо оценивать эффективность управления отвалом, варьируя параметры возмущающих воздействий, буксования, настройки автоматического регулятора и гидропривода.

Проблема управления тяговым режимом содержит две задачи: рациональный выбор рекомендуемого значения силы сопротивления копания на рабочем органе и поддержание этого значения автоматическим регулятором или человеком-оператором за счет управления высотным положением отвала. В этой главе диссертации решена задача теоретического обоснования задающего воздействия (уставки) системы управления, т.е. рекомендуемого значения силы сопротивления на рабочем органе автогрейдера [62].

4.1 Результаты имитационного моделирования тягового режима автогрейдера

Имитационная модель процесса управления тяговым режимом автогрейдера, программно реализованная в MATLAB/Simulink, содержит модели УУ, ОУ, а также модель формирования возмущающих воздействий (рисунок 4.1). В ходе вычислительного эксперимента оценивалось влияние изменяемых параметров (обведены кружками на схеме) возмущений, УУ и ОУ на величину критерия эффективности – технической производительности автогрейдера I_m и на статистические характеристики управляемой величины $P(t)$: математическое ожидание $M\{P\}$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma\{P\}$ силы сопротивления копания.

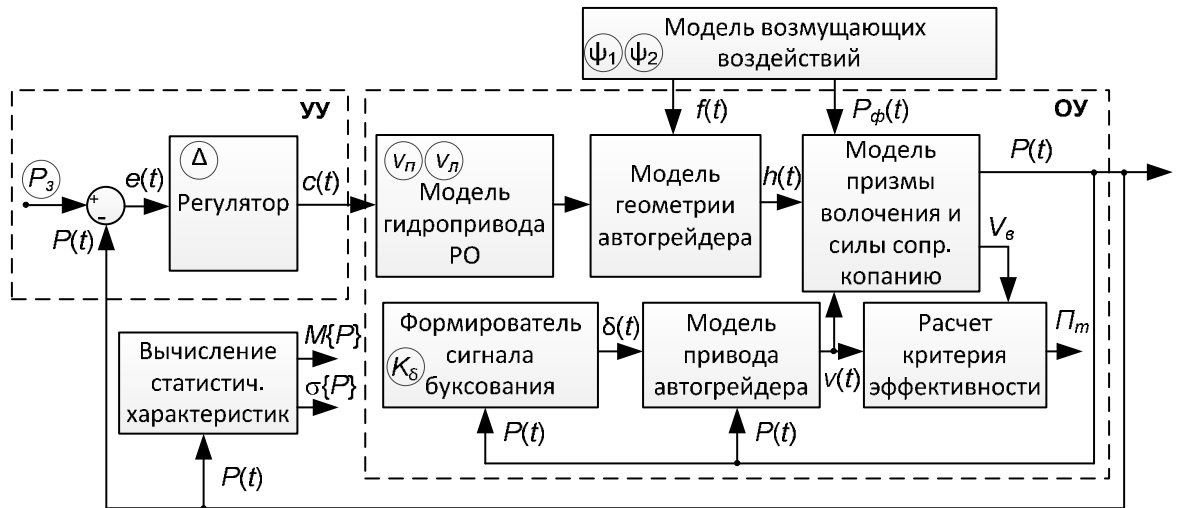


Рисунок 4.1 – Схема имитационной модели процесса управления тяговым режимом

Перед каждым прогоном модели варьировались значения параметров УУ: ширина зоны нечувствительности Δ релейного звена в составе регулятора (пороговое значение ошибки регулирования $e(t)$, при котором не формируется сигнал подъема/опускания отвала, т.е. $c(t)=0$ при $|e(t)|<\Delta$), а также заданное значение силы сопротивления копанью P_3 (задающее воздействие). При корректной настройке регулятора и параметров ОУ (отсутствие автоколебаний) математическое ожидание управляемой величины $M\{P\} \approx P_3$.

Варьируемые параметры возмущающих воздействий – это коэффициенты вариации ψ_1 и ψ_2 , влияющие на среднеквадратические отклонения генерируемых случайных сигналов – высотных координат профиля необработанной грунтовой поверхности и координаты $f(t)$ крепления переднего моста автогрейдера, а также на флуктуации $P_\phi(t)$ силы сопротивления копанью, обусловленные неоднородностью разрабатываемого грунта.

Изменяемыми параметрами ОУ являются скорости подъема/опускания правой и левой сторон отвала v_n и v_l . Эти параметры влияют на глубину копания $h(t)$ и объем вырезанного грунта V_v .

Во время прогона имитационной модели формируется сигнал буксования $\delta(t)$ на основе таблично заданной функциональной зависимости $\delta(P)$. В генерируемый

сигнал $\delta(t)$ добавляются участки повышенного буксования в соответствии с варьируемым значением параметра K_δ .

Примеры показателей тягового режима, полученные в результате двух запусков имитационной модели при различных значениях доли времени повышенного буксования, приведены на рисунках 4.2–4.11 (первый пример реализации процесса), 4.12–4.21 (второй пример реализации). Статистические характеристики показателей тягового режима для этих реализаций вычислительного эксперимента приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Статистические характеристики показателей тягового режима

	$y_n, \text{ м}$	$y_d, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$P, \text{ кН}$	$M_e, \text{ Нм}$	$v, \text{ м/с}$	δ	$N, \text{ кВт}$
$M\{P\} = 120 \text{ кН}, K_\delta = 0,2$								
$M\{\cdot\}$	-0,072	-0,096	0,087	119,5	667,2	0,99	0,168	118,0
$\sigma\{\cdot\}$	0,056	0,025	0,026	14,44	102,0	0,28	0,23	33,28
$M\{P\} = 120 \text{ кН}, K_\delta = 0,1$								
$M\{\cdot\}$	-0,069	-0,095	0,086	119,5	670,8	1,023	0,151	122,2
$\sigma\{\cdot\}$	0,033	0,019	0,016	5,6	76,84	0,21	0,169	25,74

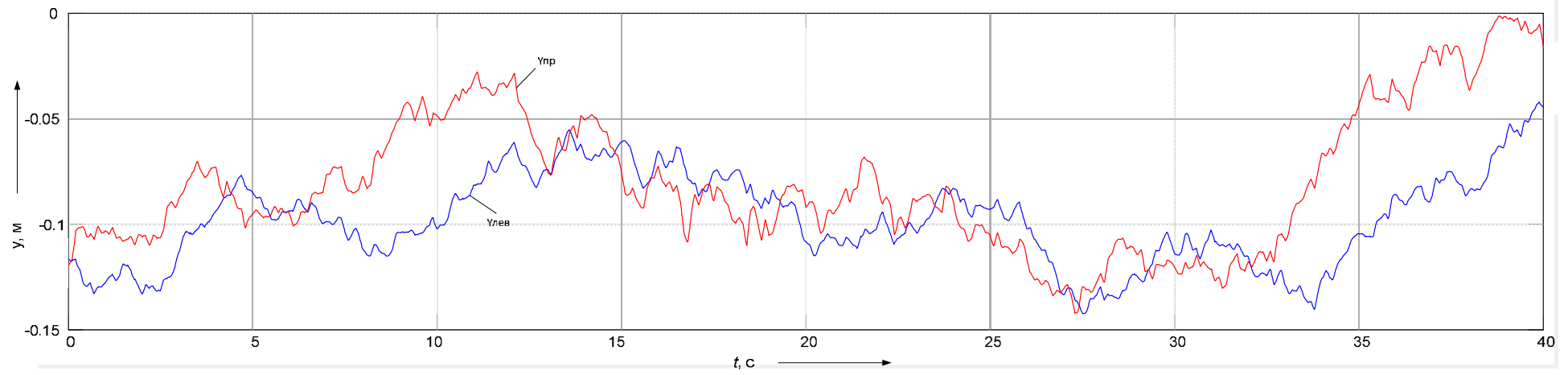


Рисунок 4.2 – Координаты левой и правой сторон отвала

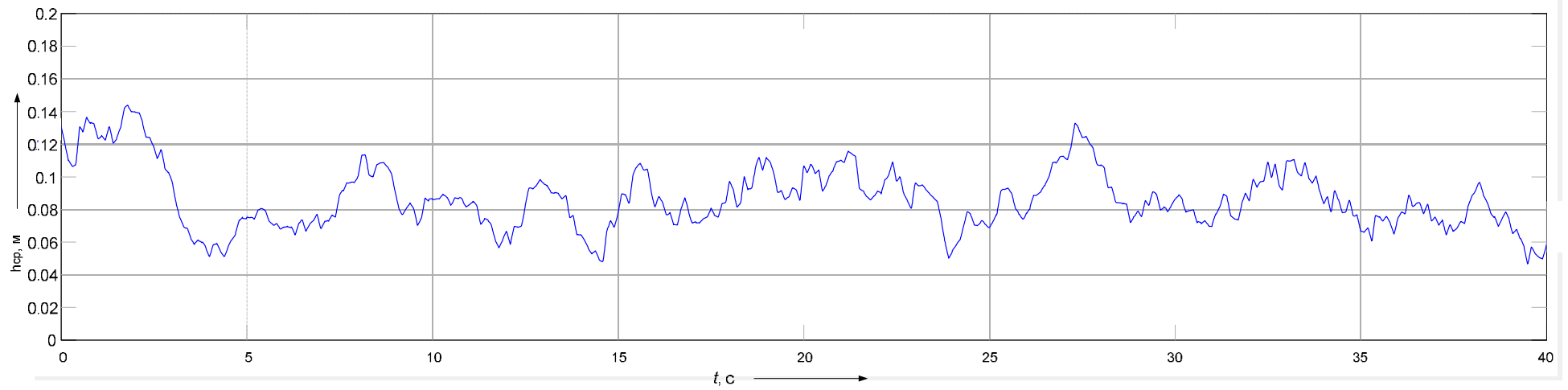


Рисунок 4.3 – Глубина резания грунта

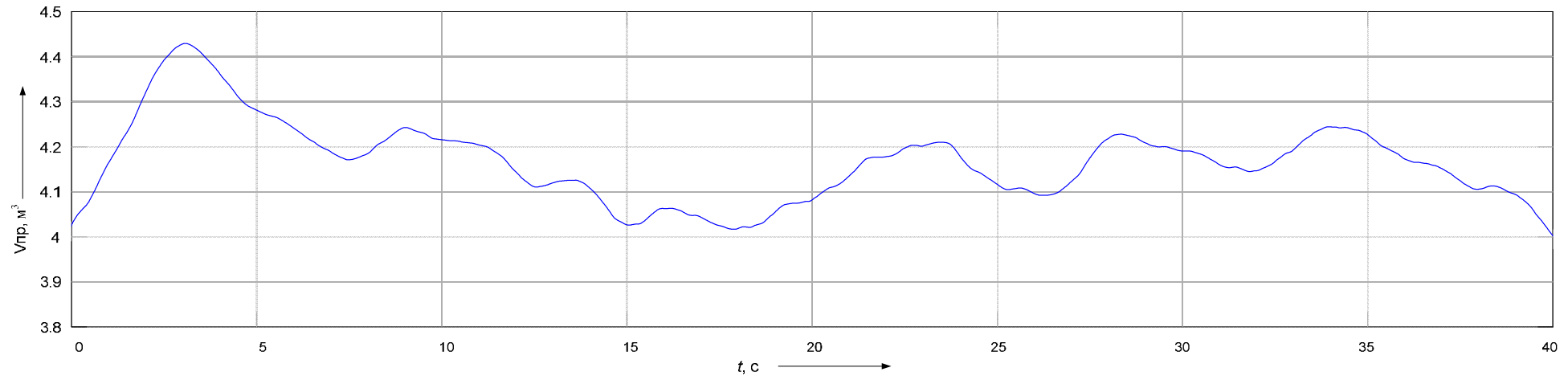


Рисунок 4.4 –Объем призмы волочения

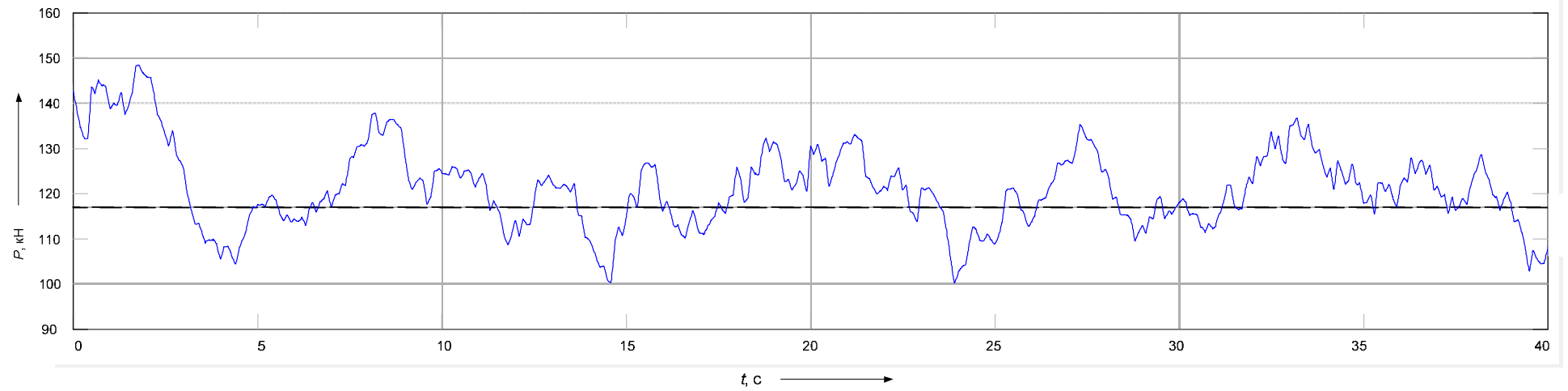


Рисунок 4.5 –Сила сопротивления копанью

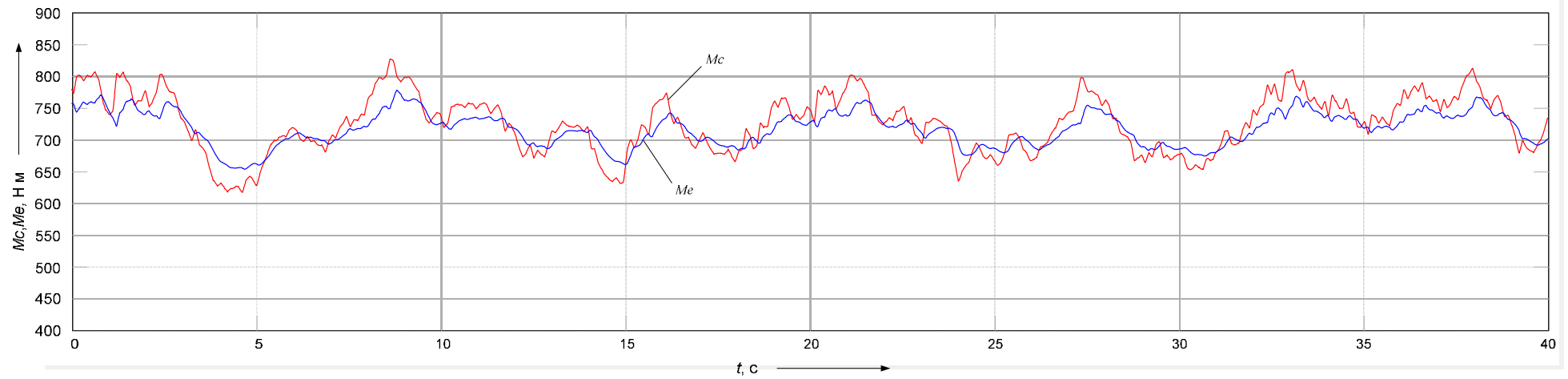


Рисунок 4.6 – Момент сопротивления на валу двигателя и момент, развиваемый двигателем

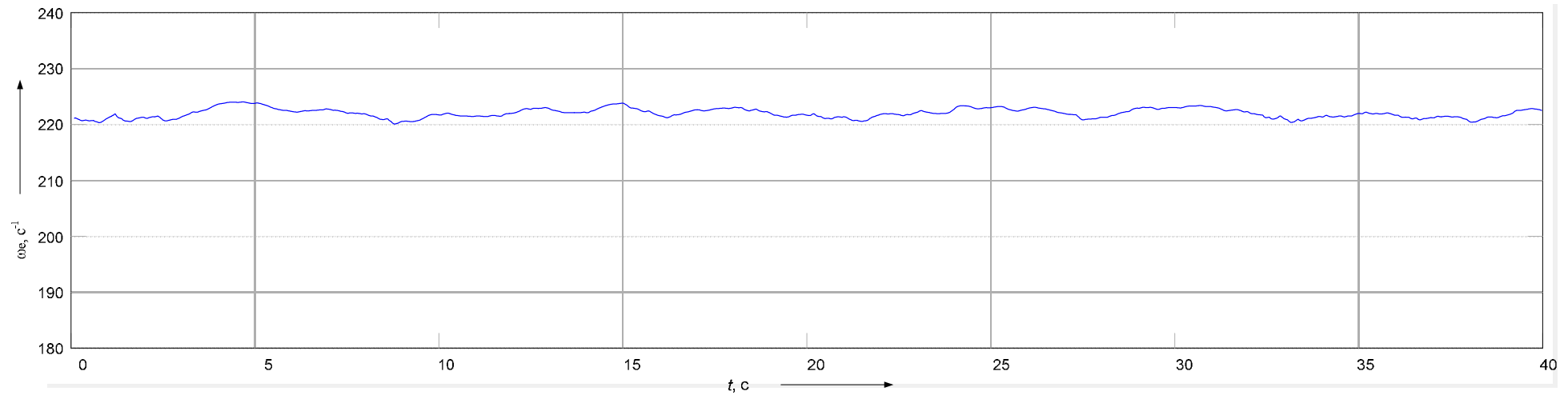


Рисунок 4.7 – Угловая скорость вала двигателя

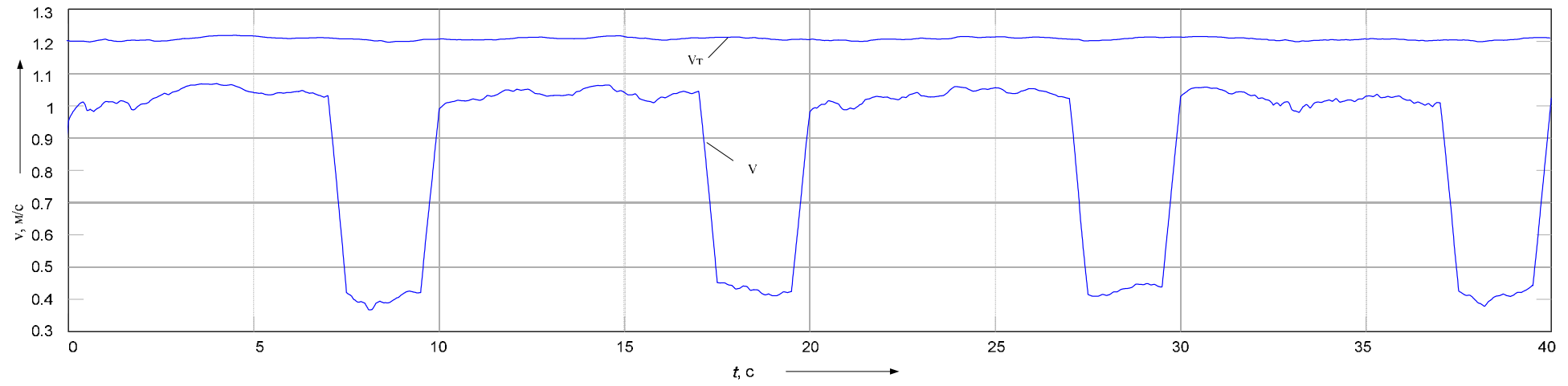


Рисунок 4.8 – Теоретическая и действительная скорость

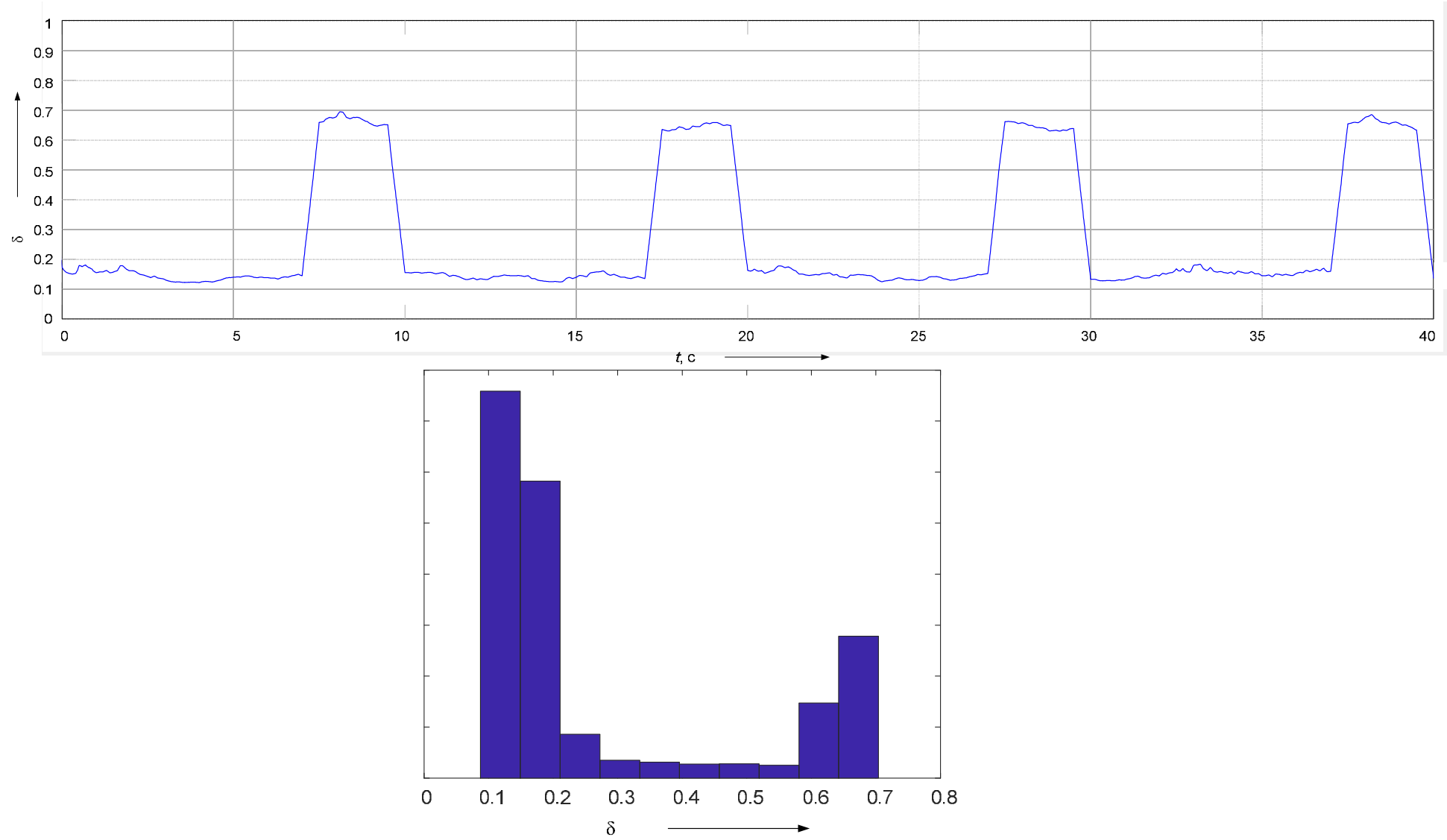


Рисунок 4.9 – Коэффициент буксования

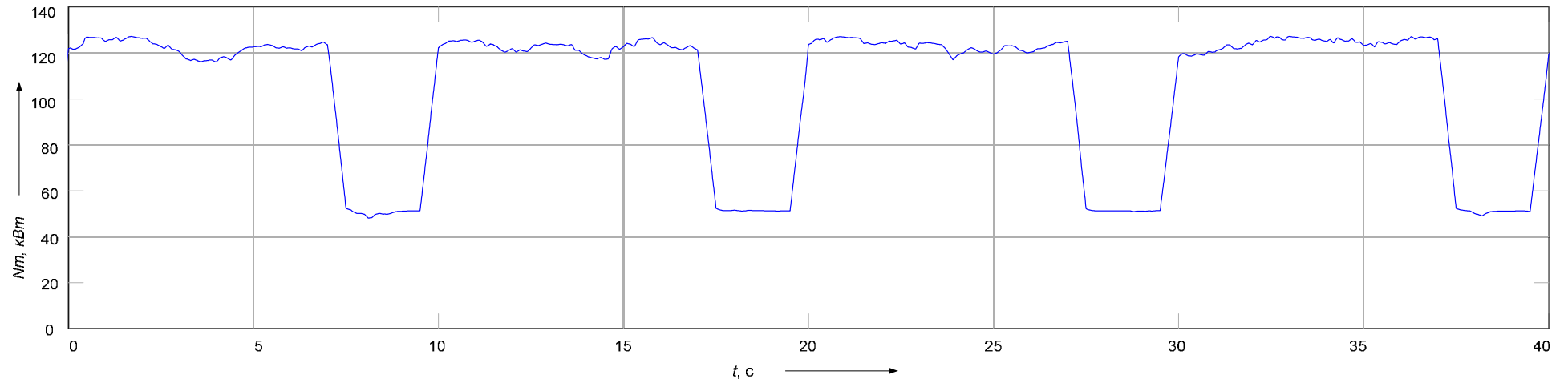


Рисунок 4.10 –Тяговая мощность

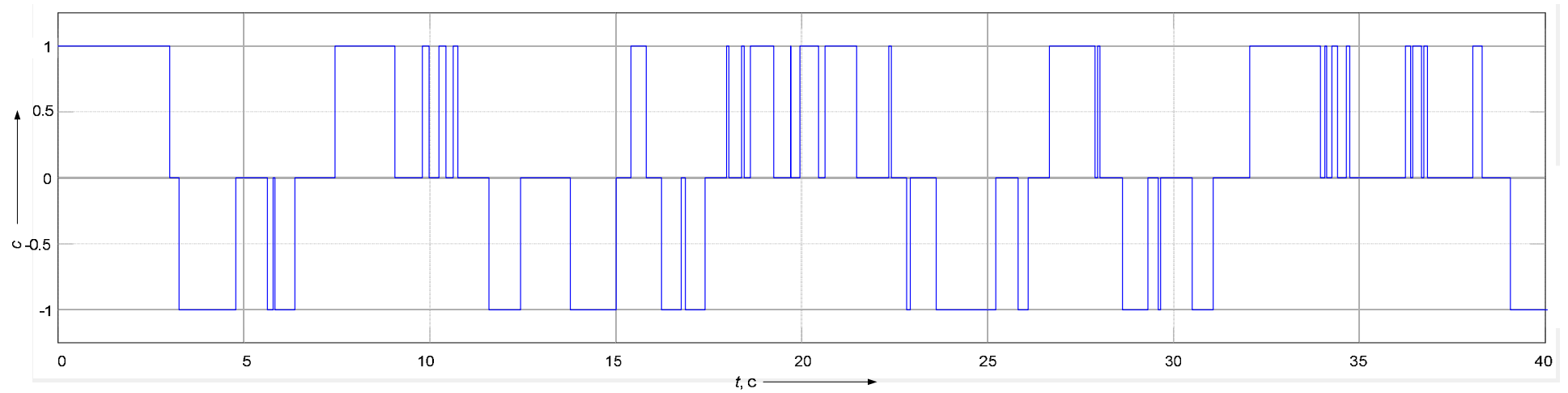


Рисунок 4.11 –Сигнал включения гидроцилиндров

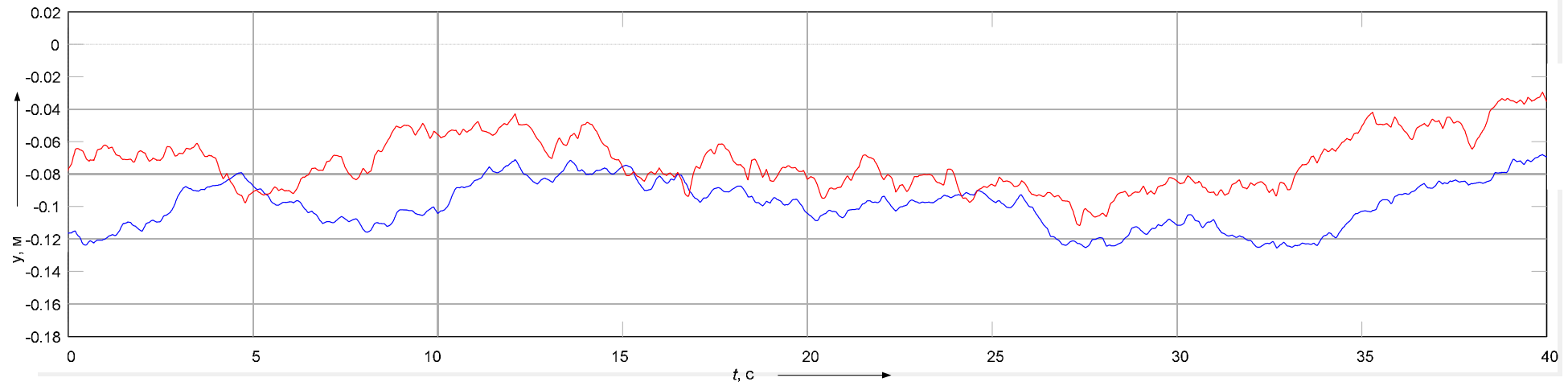


Рисунок 4.12 – Координаты левой и правой сторон отвала

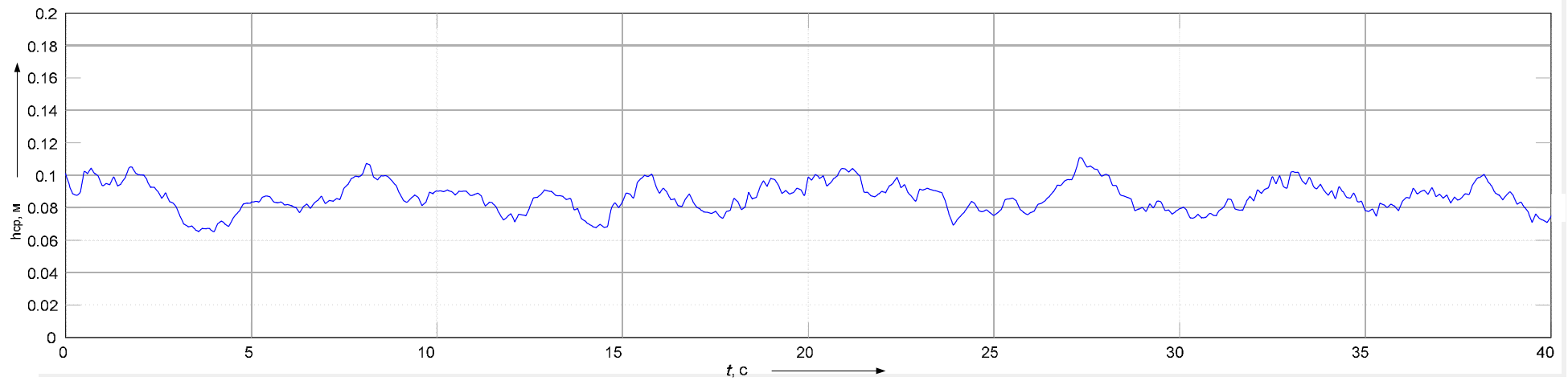


Рисунок 4.13 – Глубина резания грунта

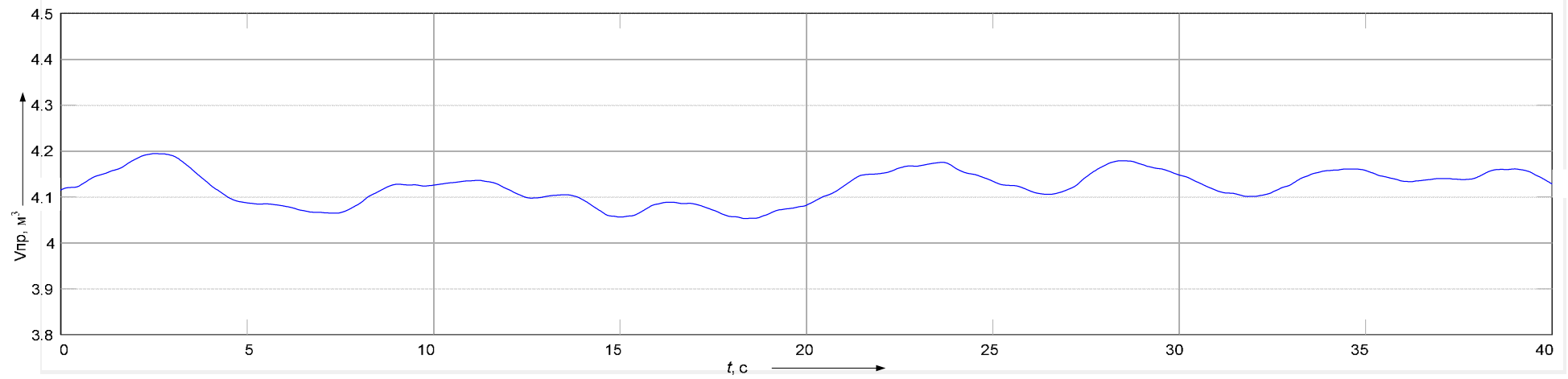


Рисунок 4.14 – Объем призмы волочения

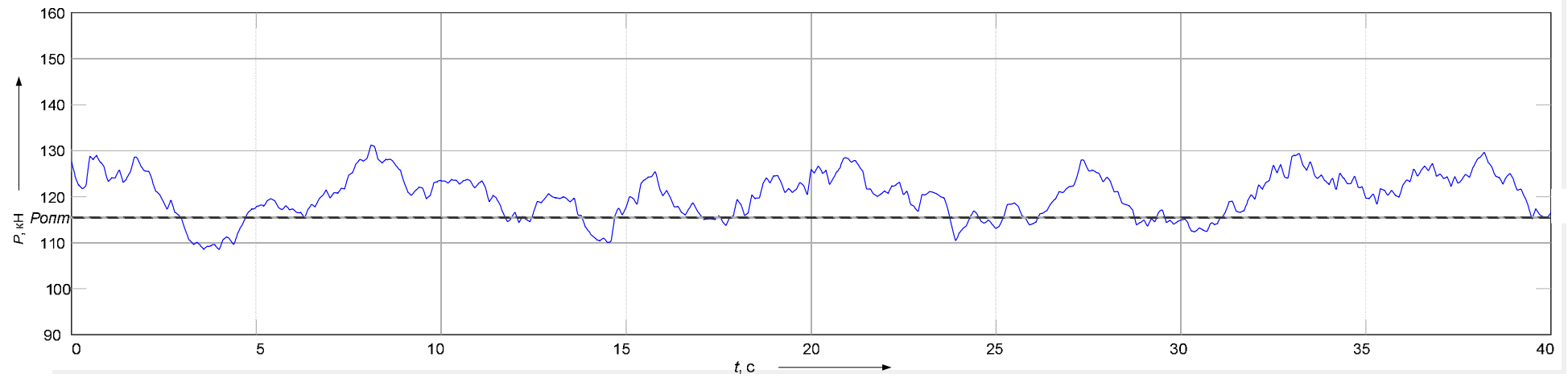


Рисунок 4.15 – Сила сопротивления копанью

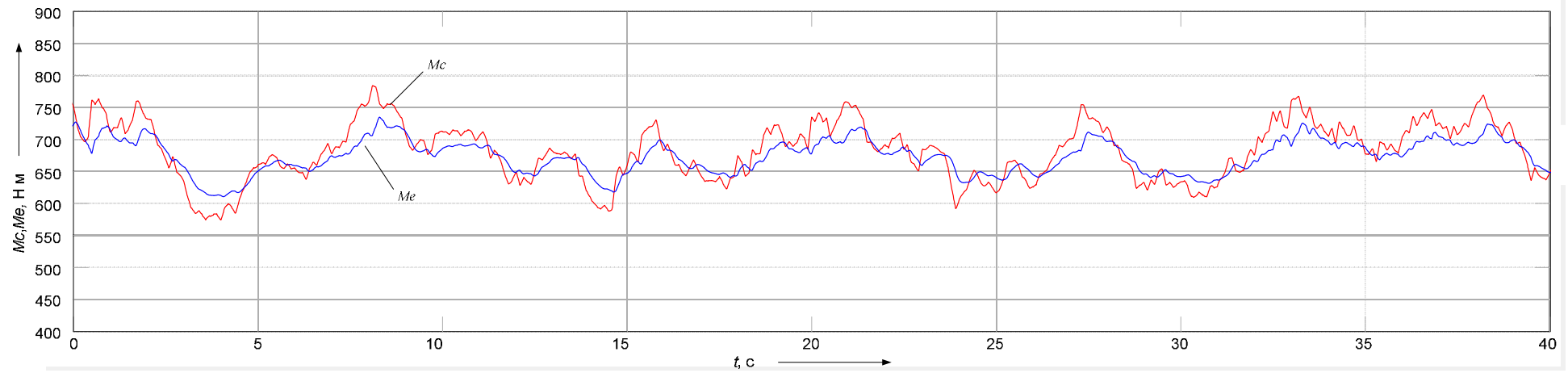


Рисунок 4.16 – Момент сопротивления на валу двигателя и момент, развиваемый двигателем

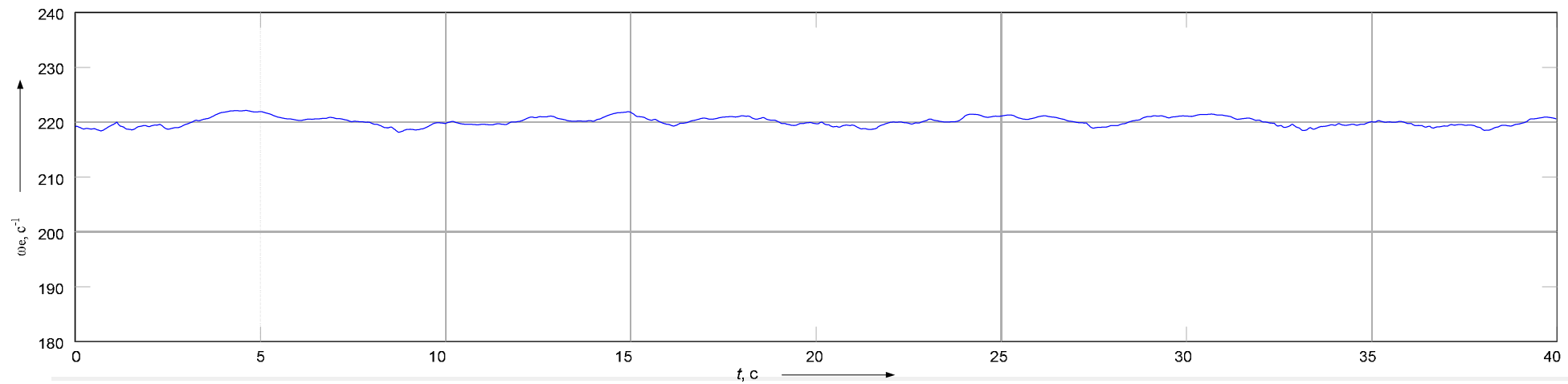


Рисунок 4.17 – Угловая скорость вала двигателя

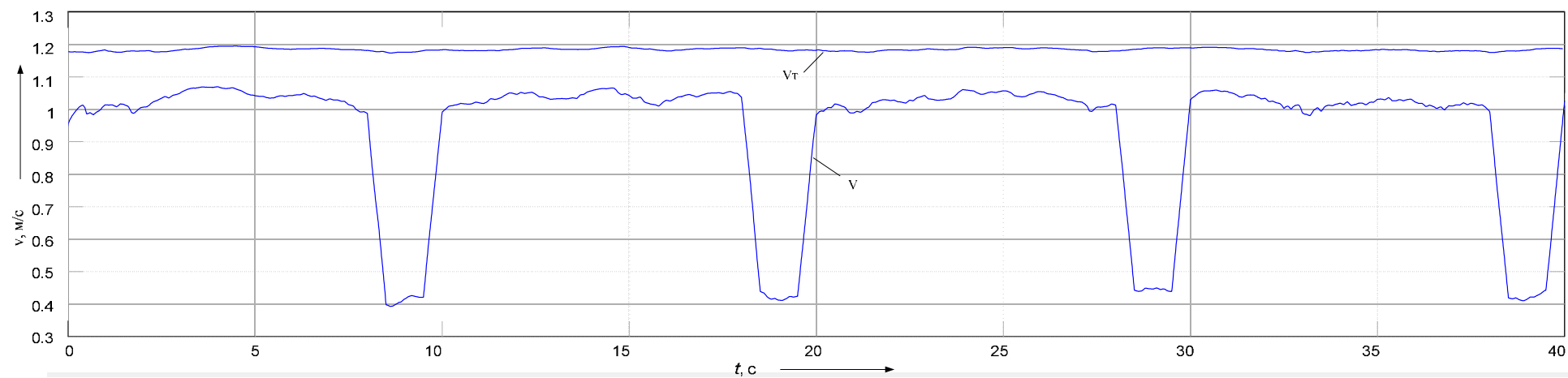


Рисунок 4.18 – Теоретическая и действительная скорость

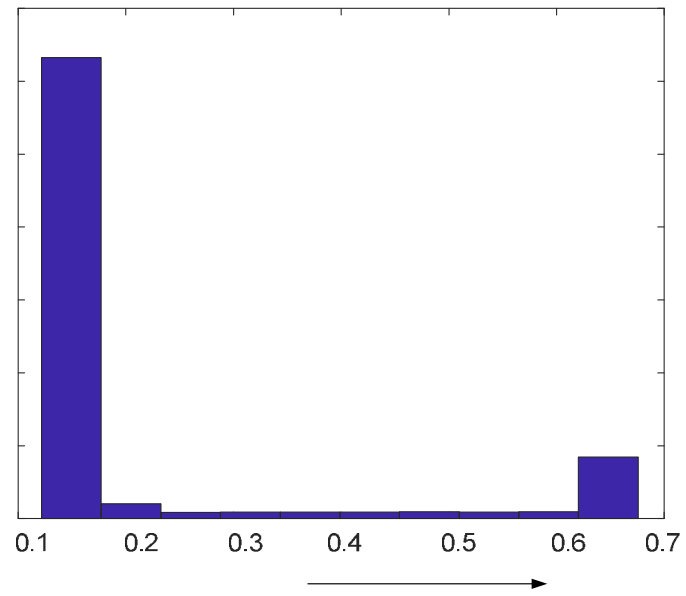
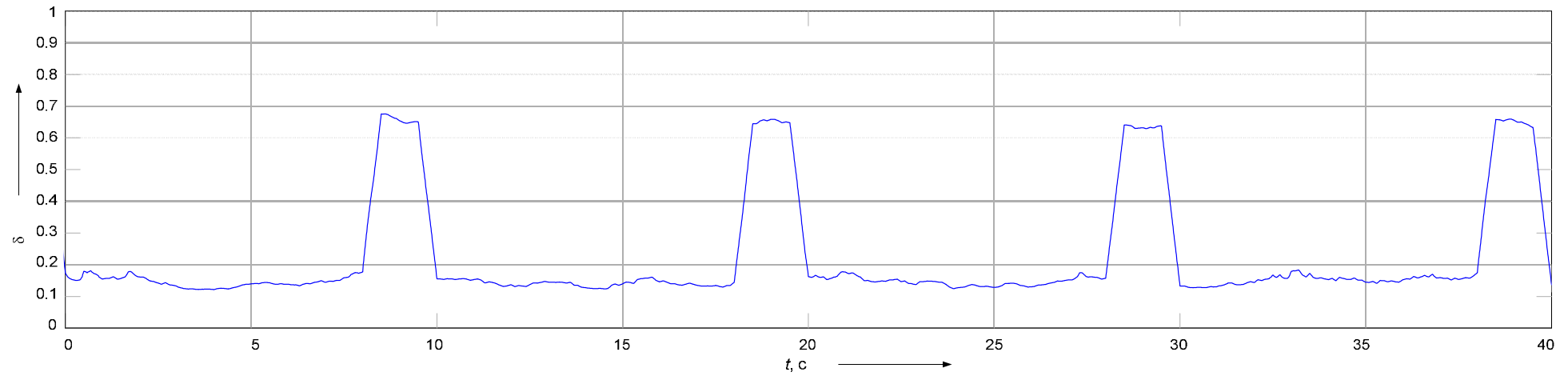


Рисунок 4.19 – Коэффициент буксования

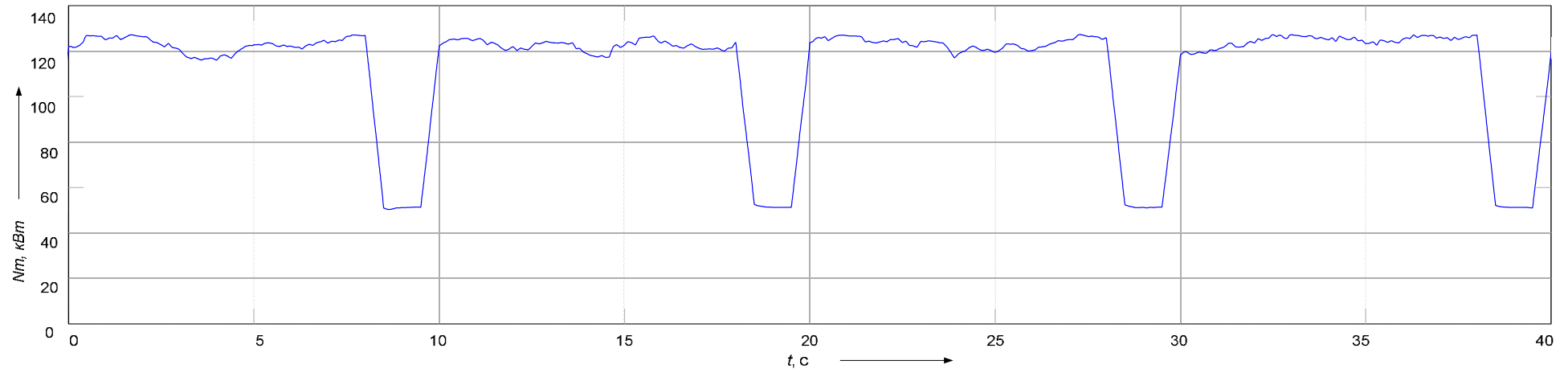


Рисунок 4.20 –Тяговая мощность

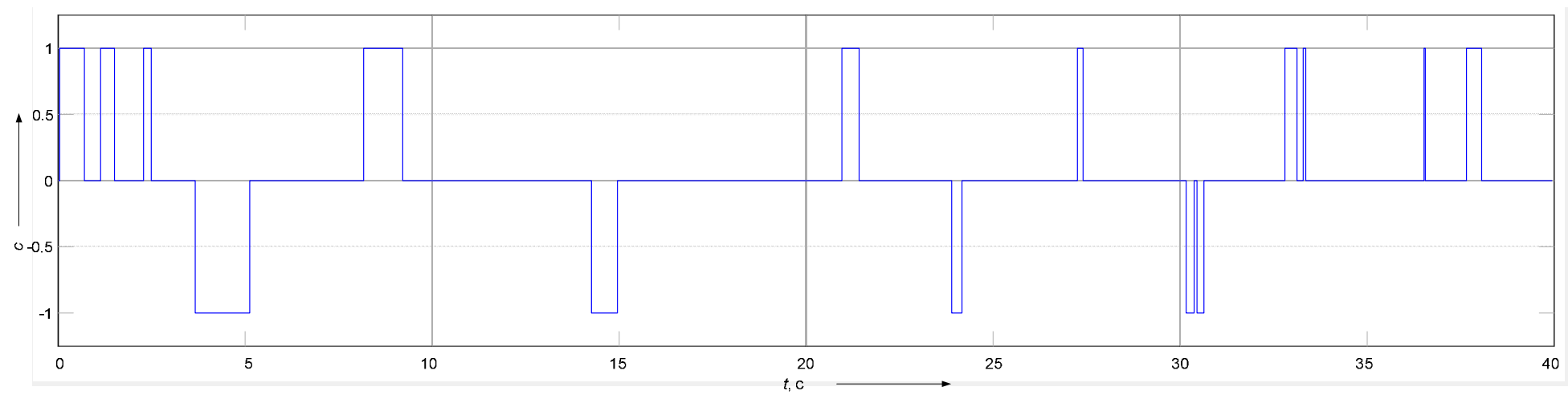


Рисунок 4.21 –Сигнал включения гидроцилиндров

4.2 Обобщение результатов имитационного моделирования тягового режима

Анализ полученных реализаций рабочего процесса автогрейдера показал следующее. Полный перебор всех возможных комбинаций значений варьируемых параметров модели нецелесообразен: вариации параметров возмущений, регулятора и ОУ оказывают наибольшее влияние на флуктуации управляемой величины и на среднеквадратическое отклонение $\sigma\{P\}$ силы сопротивления копанию, которая, в свою очередь, влияет на производительность Π_m . При различных комбинациях параметров модели можно получить близкие значения $\sigma\{P\}$, соответствующие близким значениям Π_m . Для практической реализации системы управления необходимо сократить количество измеряемых сигналов и снизить размерность пространства параметров процесса управления.

В результате имитационного моделирования множеству значений варьируемых параметров процесса управления $\Delta, P_3, v_{п}, v_{л}, \psi_1, \psi_2$ и K_δ ставится в соответствие множество значений $M\{P\}, \sigma\{P\}$ и Π_m . Параметры УУ, гидропривода и возмущений $\Delta, P_3, v_{п}, v_{л}, \psi_1, \psi_2$ оказывают воздействие на динамику системы и на статистические характеристики $M\{P\}$ и $\sigma\{P\}$. Параметр K_δ влияет в основном на действительную скорость машины $v(t)$. Поэтому для снижения размерности пространства параметров процесса управления далее исследована зависимость критерия оптимальности управления $\Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\}, K_\delta)$.

4.2.1 Определение зависимостей технической производительности автогрейдера от характеристик показателей тягового режима

Оптимальные значения задающего воздействия P_3 системы управления являются решениями задачи оптимизации:

$$P_{opt} = \arg \max_{M\{P\}} \Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\}, K_\delta). \quad (4.1)$$

Для решения задачи оптимизации необходимо исследовать зависимости $\Pi_m(M\{P\})$ при фиксированных значениях $\sigma\{P\}$ и K_δ . В результате имитационного моделирования получены дискретные значения Π_m , количество которых равно количеству прогонов модели. Для исследования целевой функции (технической производительности) при произвольных значениях $M\{P\}$, $\sigma\{P\}$ и K_δ необходима интерполяция $\Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\}, K_\delta)$.

В ходе имитационного моделирования задаваемые значения параметра процесса K_δ варьировались с шагом 0,1 в диапазоне $K_\delta=0,0\dots0,4$. Математическое ожидание управляемой величины $M\{P\}$ практически совпадает с заданным значением, которое варьировалось в диапазоне $P_3=80000\dots145000$ Н с шагом 10000 Н. Значения $\sigma\{P\}$ – это результаты прогонов модели, поэтому шаг между значениями $\sigma\{P\}$ является случайным. Поскольку в результате вычислительного эксперимента получены дискретные значения Π_m , необходима интерполяция зависимости $\Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\})$ при фиксированных значениях K_δ .

Для интерполяции получены полиномиальные зависимости $\Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\})$. В частности, при фиксированном значении $K_\delta=0$ использован аппроксимирующий полином:

$$\begin{aligned} \Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\}) = & 3299 - 0,0986 \cdot M\{P\} + 0,06767 \cdot \sigma\{P\} + 1,117 \cdot 10^{-6} \cdot M^2\{P\} - \\ & - 5,146 \cdot 10^{-7} \cdot M\{P\} \cdot \sigma\{P\} - 3,318 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma^2\{P\} - 3,786 \cdot 10^{-12} \cdot M^3\{P\} - \\ & - 1,958 \cdot 10^{-12} \cdot M^2\{P\} \cdot \sigma\{P\} + 3,274 \cdot 10^{-11} \cdot M\{P\} \cdot \sigma^2\{P\}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Нормированный коэффициент детерминации $\bar{R}^2 = 0,94$ показывает высокую точность аппроксимации. Далее вместо значений Π_m , полученных в результате вычислительного эксперимента, используются аппроксимированные значения. На рисунке 4.22 показаны зависимости технической производительности от математического ожидания силы сопротивления, соответствующие (4.2).

Процедура выбора оптимальных значений задающего воздействия (рекомендуемого значения поддерживаемой силы сопротивления на РО) показана на рисунке 4.22. При фиксированных значениях K_δ и $\sigma\{P\}$ по формуле (4.2) строятся графики зависимости $\Pi_m(M\{P\})$, и каждому графику ставится в соответствие оп-

тимальное значение $M\{P\}$ по критерию максимальной производительности, т.е. находится решение задачи (4.1). Таким образом формируется массив оптимальных значений P_{opt} , зависящих от $\sigma\{P\}$ и K_δ . При малом шаге изменения $M\{P\}$ решение задачи оптимизации может быть найдено перебором дискретных значений Π_m .

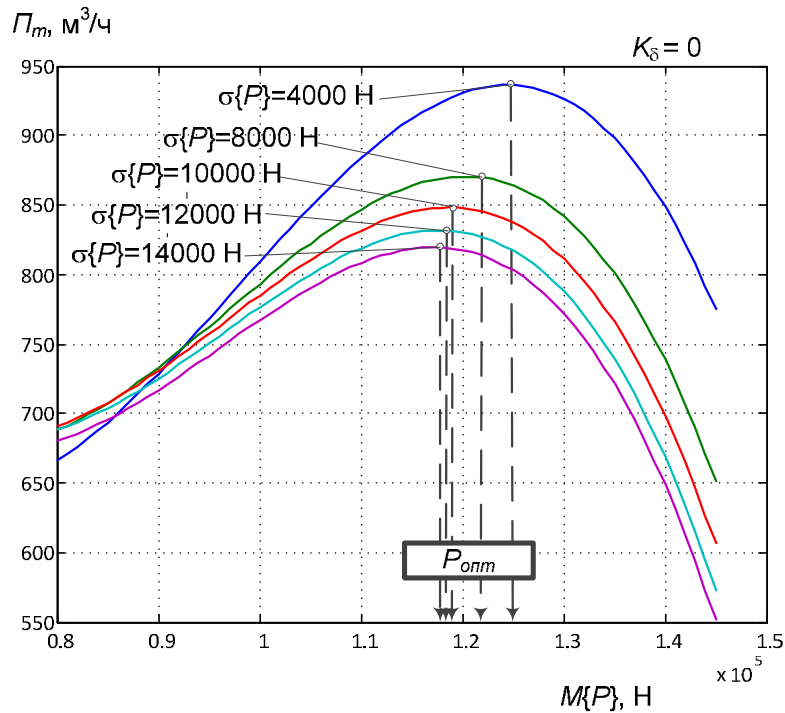


Рисунок 4.22 – Выбор оптимального задающего воздействия

4.2.2. Определение зависимостей удельного расхода топлива от характеристик показателей тягового режима

При использовании альтернативного критерия эффективности автогрейдера – удельного расхода топлива g_n оптимальное заданное значение силы сопротивления на РО определяется решением задачи оптимизации

$$P_{opt} = \arg \min_{M\{P\}} g_n(M\{P\}, \sigma\{P\}, K_\delta) \quad (4.3)$$

По аналогии с разделом 4.2.1. получены зависимости альтернативного критерия g_n от характеристик силы сопротивления и буксования (рисунок 4.23). Максимальные значения технической производительности не соответствуют мини-

мальным значениям удельного расхода топлива, т.е. задачи (4.1) и (4.2) имеют разные оптимальные решения.

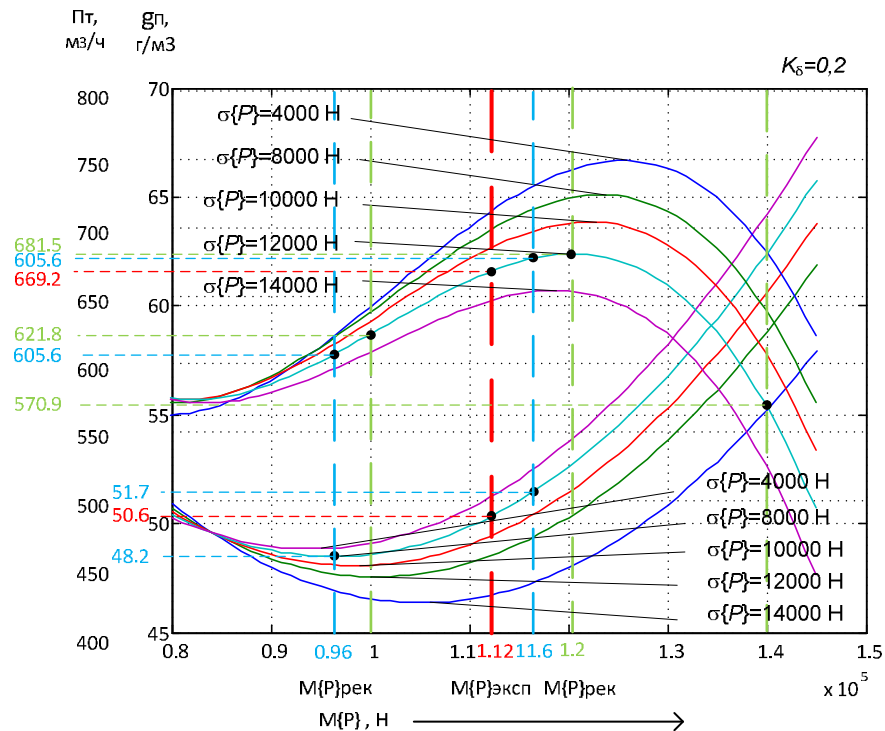


Рисунок 4.23 – Значения критериев эффективности

Выполнено сравнение значений критериев Π_m и g_n при оптимальных настройках системы по этим критериям, а также при экспериментальном значении математического ожидания $M\{P\}_{эксп}$ силы сопротивления копания [66]. Характеристики показателей тягового режима, использованные для сравнения критериев (рисунок 4.24), соответствуют результатам натурального эксперимента: $K_\delta=0,2$, $\sigma\{P\}=12000$ Н.

При анализе этих зависимостей можно выявить, какому математическому ожиданию силы сопротивления копания соответствуют оптимальные значения технической производительности (точка A_3) и удельного расхода топлива (точка B_1).

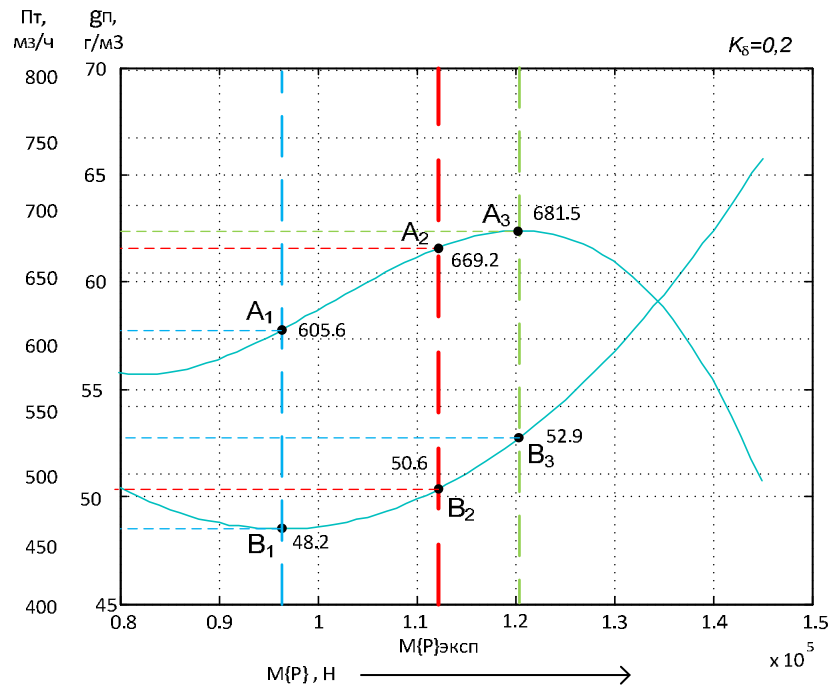


Рисунок 4.24 – Сравнение альтернативных критериев

Так, максимальному значению технической производительности $P_m = 681,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ соответствует точка A_3 , оптимальное математическое ожидание силы сопротивления копанью $M\{P\} = 121 \text{ кН}$; при этом значение удельного расхода топлива $g_n = 52,9 \text{ г/м}^3$ (точка B_3) не является минимальным.

Минимальному значению удельного расхода топлива (точка B_1) соответствует $g_n = 48,2 \text{ г/м}^3$, что соответствует математическому ожиданию силы сопротивления копанью $M\{P\} = 96 \text{ кН}$; при этом значение технической производительности (точка A_1) $P_m = 605,6 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Если за критерий эффективности взять техническую производительность, то значение удельного расхода топлива увеличится по сравнению с минимальным значением на 8,8%, а если принять за критерий эффективности удельный расход топлива, то техническая производительность (точка A_1) снизится по сравнению с максимумом на 11,1%.

По результатам экспериментальных исследований, при ручном управлении отвалом и $M\{P\}_{\text{эксп}} = 11,2 \text{ кН}$, значения технической производительности $P_m = 669,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ (точка A_2) и удельного расхода топлива $g_n = 50,6 \text{ г/м}^3$ (точка B_2),

что соответствует средней нагрузке в интервале между оптимальными значениями по двум критериям.

Техническая производительность в большей степени изменяется при изменении $M\{P\}$. В результате анализа выбран критерий эффективности для настройки системы управления – техническая производительность автогрейдера.

4.3 Определение зависимости рекомендуемых значений силы сопротивления на РО от характеристик показателей тягового режима

Формирование массива оптимальных значений задающего воздействия P_{opt} выполнено в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Задать значения параметров имитационной модели, варьируемых в заранее определенных диапазонах и с определенным шагом: $\Delta, P_z, \psi_1, \psi_2, v_n, v_d$.
2. Задать значение доли времени повышенного буксования K_δ .
3. Выполнить запуск имитационной модели, сохранить результаты (значения моделируемых показателей тягового режима). Проверить отсутствие автоколебаний в системе управления по графикам показателей процесса.
4. Вычислить и записать в массив полученные значения $M\{P\}, \sigma\{P\}, P_m$. Шаги 1–4 повторяются до завершения вычислительного эксперимента.
5. Задать фиксированное значение K_δ .
6. Построить аппроксимирующий полином 2–3 порядка для зависимости $P_m(M\{P\}, \sigma\{P\})$ по аналогии с выражением (4.2).
7. Задать фиксированное значение $\sigma\{P\}$.
8. Изменяя $M\{P\}$, построить график аппроксимирующей зависимости $P_m(M\{P\}, \sigma\{P\})$ по аналогии с рисунком 4.22. Шаги 7 и 8 повторяются для всех варьируемых значений $\sigma\{P\}$ при фиксированном значении K_δ .
9. Найти оптимальные значения математического ожидания силы сопротивления копания (рисунок 4.14), записать в двумерный массив значения P_{opt} . Шаги 5–9 повторяются до получения всех комбинаций значений $(K_\delta, \sigma\{P\})$, варьируемых с заданным шагом, и соответствующих значений P_{opt} .

Результат формирования массива оптимальных значений задающего воздействия $P_{\text{опт}}$ показан на рисунке 4.26. Эта зависимость используется как справочная таблица при формировании задающего воздействия системы управления следующим образом.

По конкретным значениям характеристик $\sigma\{P\}$ и K_{δ} , полученным в результате измерения и обработки показателей предыдущего рабочего прохода автогрейдера, при помощи линейной двумерной табличной интерполяции вычисляется значение $P_{\text{опт}}$, соответствующее точке на поверхности. Это оптимальное значение силы сопротивления копания, которое должно поддерживаться системой управления отвалом во время следующего рабочего прохода для максимизации технической производительности автогрейдера.

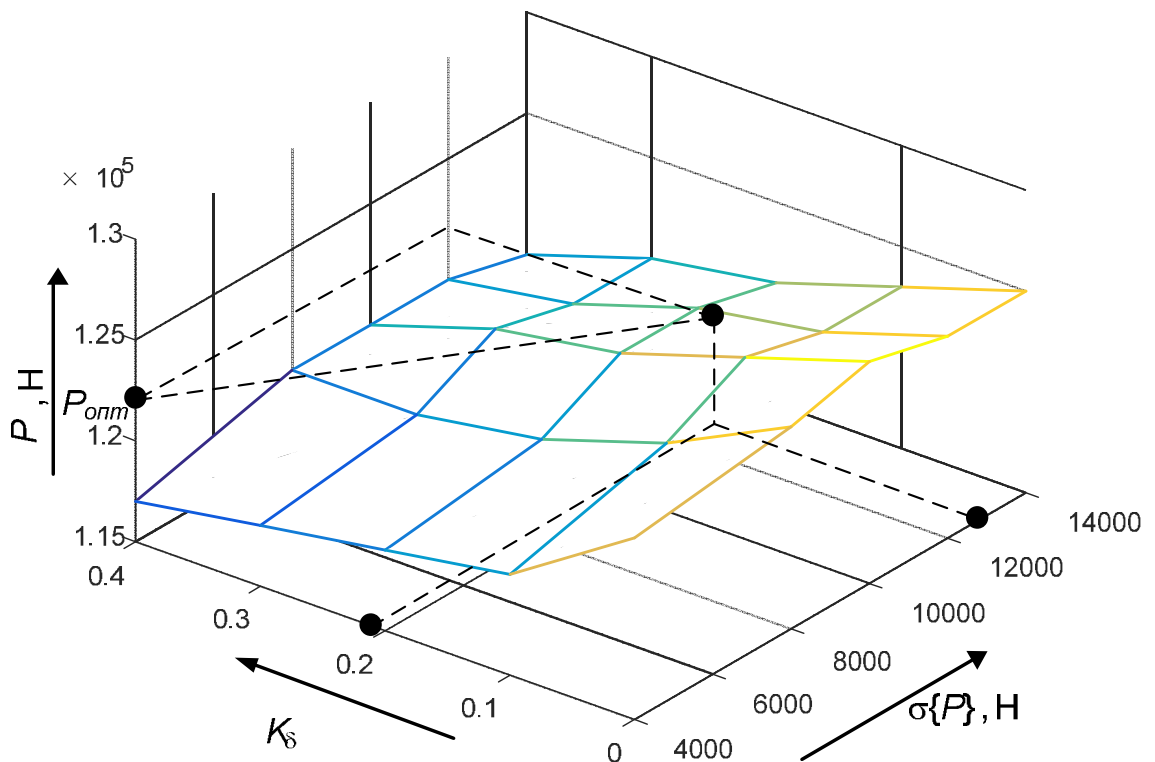


Рисунок 4.26 – Зависимость оптимального задающего воздействия от среднеквадратического отклонения силы сопротивления копанию и доли времени повышенного буксования

По результатам имитационного моделирования системы с оптимальными настройками значений $P_3 = P_{\text{опт}}$ построены зависимости (рисунок 4.27) критериев эффективности процесса управления тяговым режимом от доли времени повышен-

ного буксования K_8 и среднеквадратического отклонения силы сопротивления копанью $\sigma\{P\}$. Максимальная техническая производительность снижается с увеличением случайных отклонений силы сопротивления копанью и с увеличением доли времени повышенного буксования. Минимальный расход топлива растет с увеличением случайных отклонений силы сопротивления копанью и с увеличением доли времени повышенного буксования. Полученные результаты не противоречат результатам исследований предшествующих авторов.

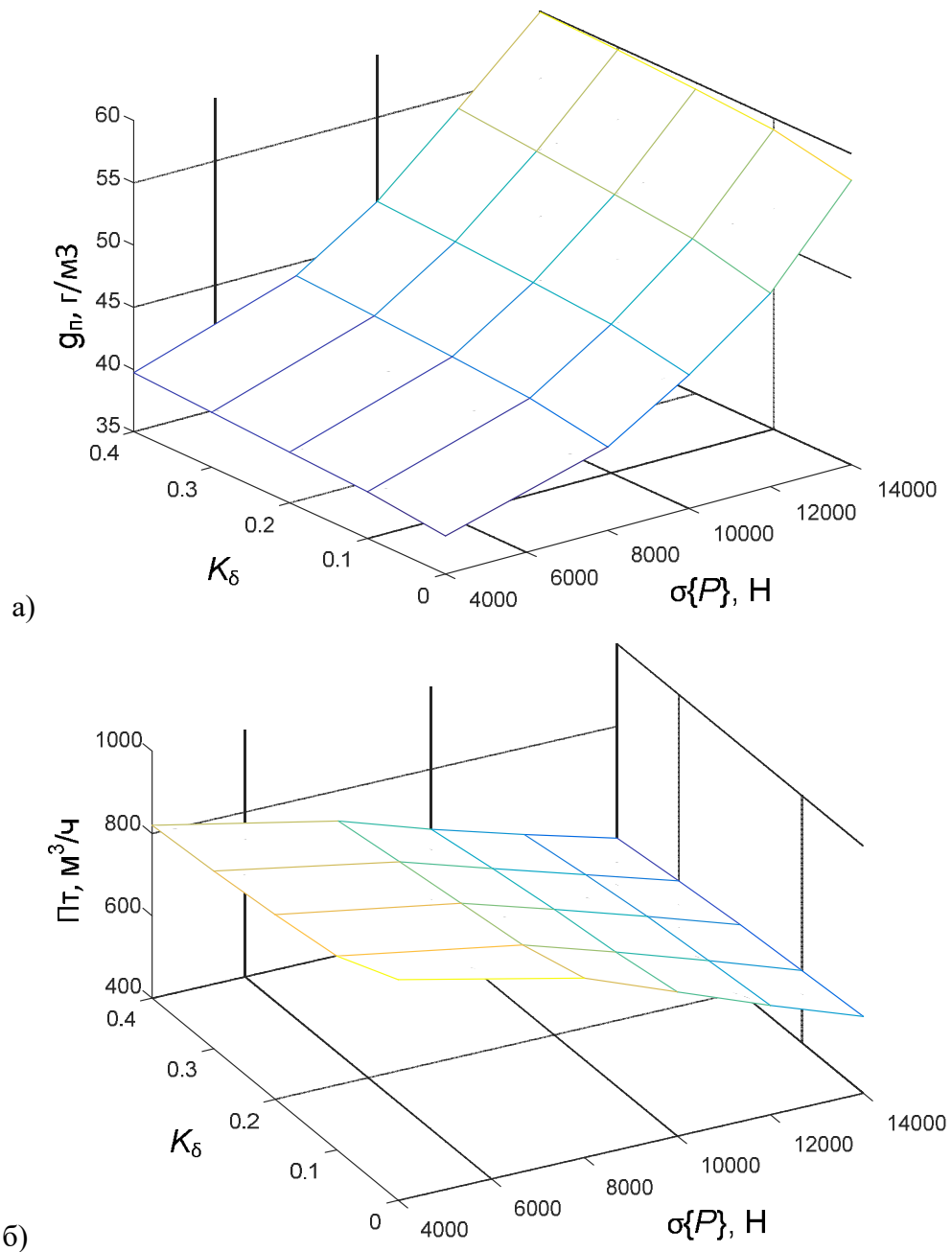


Рисунок 4.27 – Зависимости критериев эффективности от характеристик показателей тягового режима при рекомендованных значениях поддерживаемой силы сопротивления на РО:
а) удельный расход топлива; б) техническая производительность.

4.4 Разработка модели системы управления отвалом автогрейдера

4.4.1 Структура системы управления и управляющего устройства

Для поддержания рекомендованного значения силы сопротивления на РО в автоматическом или ручном режиме необходимо обеспечить формирование задающего воздействия в соответствии с зависимостью, представленной на рисунке 4.26. Для решения этой задачи разработана структура управляющего устройства (УУ), содержащая формирователь задающего воздействия (ФЗВ). Входными сигналами УУ являются измеренные значения силы сопротивления на РО и коэффициент буксования (рисунок 4.28).

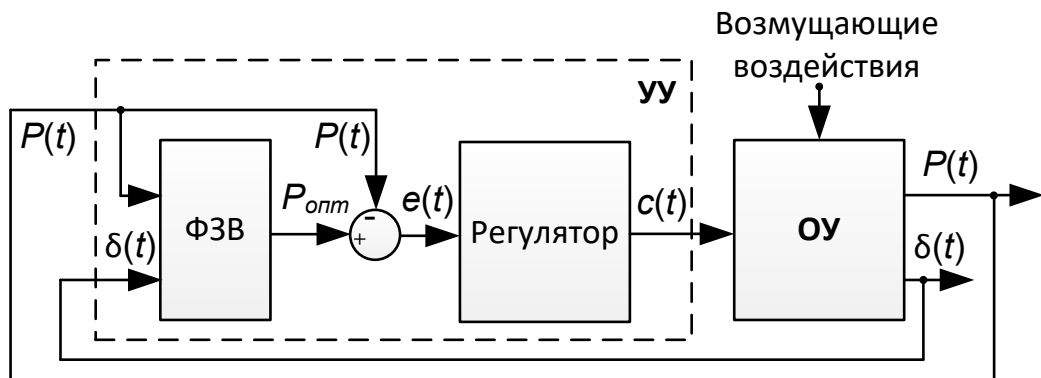


Рисунок 4.28 – Функциональная схема системы управления тяговым режимом автогрейдера

Вычисление значений оптимального задающего воздействия $P_{опт}$ перед новым рабочим проходом автогрейдера выполняется на основе информации о характеристиках сигналов $P(t)$ и $\delta(t)$, измеренных во время предыдущего рабочего прохода при помощи датчиков. Сигнал коэффициента буксования $\delta(t)$ при физической реализации системы должен быть заменен парой сигналов, соответствующих действительной $v(t)$ и теоретической $v_m(t)$ скоростям автогрейдера. Вычисление мгновенных значений коэффициента буксования может быть выполнено программно в ФЗВ по формуле

$$\delta(t) = (v_m(t) - v(t)) / v_m(t). \quad (4.4)$$

Формирователь задающего воздействия (ФЗВ) в составе микропроцессорного УУ содержит блок запоминания сигналов (рисунок 4.29). Перед началом рабочего

прохода поступает команда, инициирующая запоминание оцифрованных сигналов $P(t)$ и $\delta(t)$.

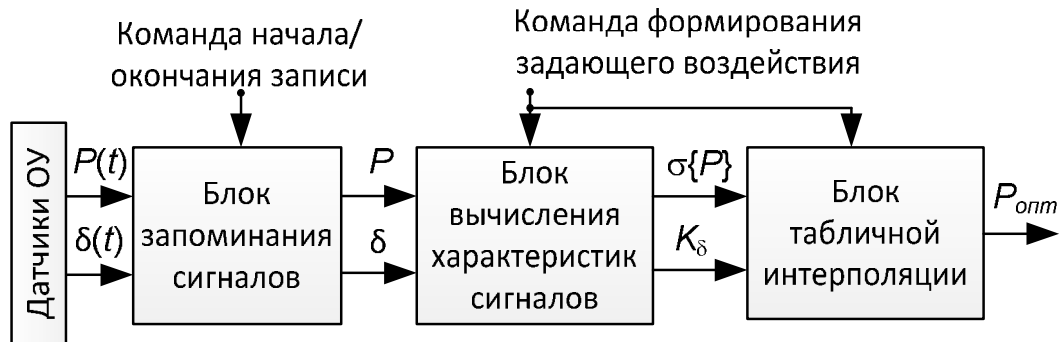


Рисунок 4.29 – Функциональная схема формирователя задающего воздействия

Выполненный анализ существующих реализаций систем управления (СБУК, САУРО и др.) показал, что при проектировании УУ необходимо предусмотреть также ручной режим управления отвалом и режим индикации рекомендаций оператору по управлению отвалом. В связи с этим увеличено количество информационных каналов УУ (рисунок 4.30).

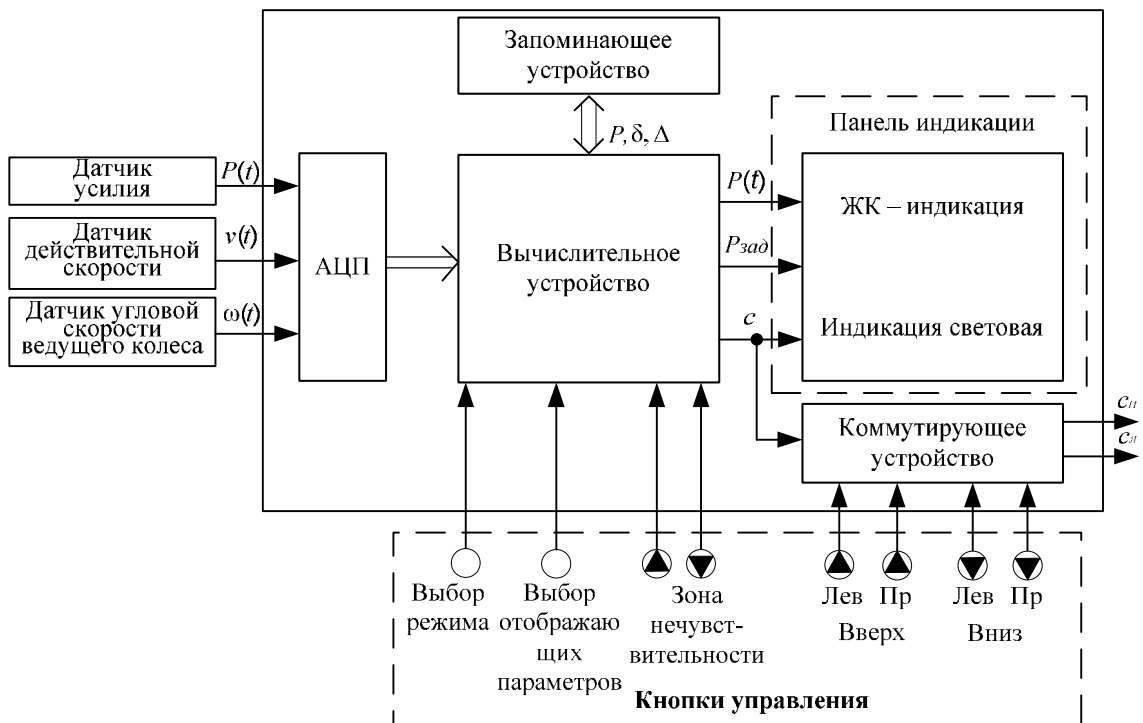


Рисунок 4.30 – Информационные каналы управляющего устройства

4.4.2 Алгоритм функционирования управляющего устройства

По команде формирования задающего воздействия перед началом рабочего прохода (она может быть совмещена с командой, инициирующей окончание записи сигналов), в ФЗВ выполняется следующий алгоритм.

1. Анализ записанного сигнала $P(t)$, выявление участков установившегося процесса, близкого к стационарному.
2. Определение длительности T_s установившегося случайного процесса $P(t)$.
3. Вычисление среднеквадратического отклонения $\sigma\{P\}$ силы сопротивления копанию.
4. Вычисление значений $\delta(t)$, если вместо сигнала $\delta(t)$ в блок запоминания поступают сигналы теоретической и действительной скоростей $v_m(t)$ и $v(t)$.
5. Анализ $\delta(t)$ на временном интервале T_s . Выявление интервалов T_i с повышенным буксованием.
6. Расчет доли времени повышенного буксования K_δ в соответствии с (3.7).
7. Расчет оптимального значения задающего воздействия с помощью линейной двумерной табличной интерполяции зависимости $P_{opt}(\sigma\{P\}, K_\delta)$.

Шаги алгоритма 1...6 выполняются в блоке вычисления характеристик сигналов ФЗВ, шаг 7 – в блоке табличной интерполяции.

4.4.3 Рекомендации по проектированию системы управления рабочим органом автогрейдера

Для реализации алгоритмов управления тяговым режимом предлагается проект блока управления, выполняющего функции УУ и обеспечивающего взаимодействие с человеком-оператором. Блок управления содержит:

- аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи (АЦП/ЦАП);
- бортовой вычислитель на базе одноплатного микрокомпьютера с внешним запоминающим устройством и контроллером устройств индикации и устройств ввода панели управления;

- панель управления для обеспечения взаимодействия с человеком-оператором;
- коммутатор управляющих сигналов.

Входами АЦП являются выходные аналоговые электрические сигналы с первичных преобразователей – датчиков силы, действительной и теоретической скорости, а также сигналы с кнопок – устройств ввода панели управления (возможен также вариант использования контроллера панели управления для оцифровки сигналов).

Выходами ЦАП являются аналоговые электрические сигналы включения двух электроуправляемых гидрораспределителей гидроцилиндров подъема-опускания правой и левой сторон грейдерного отвала.

На вход коммутатора управляющих сигналов поступают сигналы включения гидрораспределителей с выхода автоматического регулятора и с устройств ввода панели управления. Приоритет имеют сигналы, формируемые человеком-оператором.

Бортовой вычислитель реализует следующие алгоритмы и функции управляющего устройства:

- алгоритмы взаимодействия управляющего устройства с человеком-оператором через устройства ввода и индикации панели управления;
- программную обработку входных оцифрованных сигналов датчиков, вычисление и хранение характеристик показателей тягового режима;
- алгоритмы формирования оптимального задающего воздействия (выбор поддерживаемого значения силы сопротивления копания грунта на рабочем органе в зависимости от характеристик показателей тягового режима);
- алгоритмы регулятора системы автоматического управления, формирование управляющих сигналов включения гидроцилиндров отвала.

Панель управления блока (рисунок 4.31) имеет устройства ввода и индикации, размещенные в нескольких зонах.

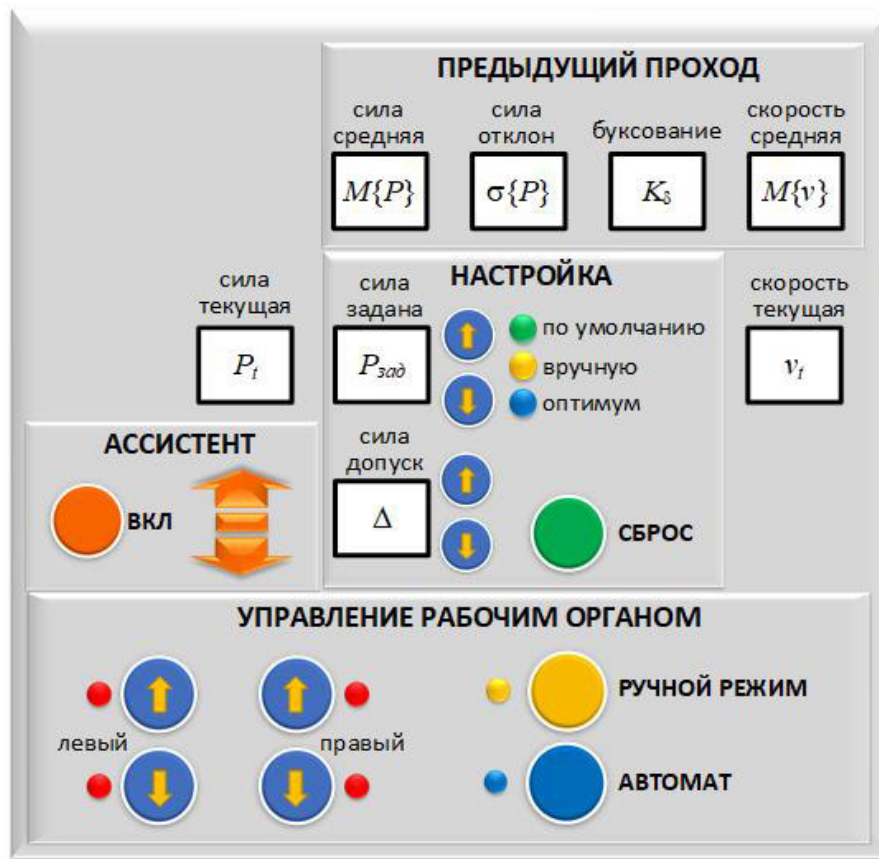


Рисунок 4.31 – Панель блока системы управления рабочим органом автогрейдера

Зона «Предыдущий проход» предназначена для вывода оператору характеристик показателей тягового режима, вычисленных на основе данных, собранных во время предыдущего рабочего прохода автогрейдера: математическое ожидание силы сопротивления копанию, среднеквадратическое отклонение силы сопротивления копанию, доля времени повышенного буксования, математическое ожидание действительной скорости.

Зона «Настройка» предназначена для индикации заданного значения силы сопротивления копанию «Сила задана», а также для ручной корректировки этой величины оператором (кнопки «вверх» и «вниз»). Одновременно может быть включен один из трех светодиодных индикаторов для заданного значения силы: «по умолчанию», «вручную», «оптимум». Оператор в этой зоне панели также задает ширину зоны нечувствительности регулятора «Сила допуск» (допустимое отклонение текущего значения силы сопротивления от заданного, при котором привод рабочего органа не активируется). Кнопка

«Сброс» восстанавливает значения по умолчанию заданной силы сопротивления и ширины зоны нечувствительности.

Текущая сила (сопротивления на рабочем органе) и текущая скорость машины (действительная) непрерывно отображаются на панели управления после включения блока управления.

Зона «Ассистент» предназначена для индикации рекомендаций человеку-оператору по управлению высотным положением грейдерного отвала (подъем/стоп/заглубление отвала). Индикация соответствует значениям управляющего сигнала на выходе регулятора системы управления. Кнопка «Вкл» позволяет включать/отключать режим индикации рекомендаций.

Зона «Управление рабочим органом» предназначена для ввода управляющих сигналов человеком-оператором (подъем/опускание правой и левой сторон грейдерного отвала) и отображения управляющих гидрораспределителями сигналов с помощью соответствующих светодиодных индикаторов. Кнопки выбора режима (ручной режим/автомат) отключают/включают передачу управляющего сигнала с выхода автоматического регулятора на коммутатор и гидрораспределители.

Блок управления функционирует следующим образом. После включения блока управления запускается программное обеспечение бортового вычислителя. По умолчанию устанавливаются заданное значение силы сопротивления копания $P_3=12$ кН и значение ширины зоны нечувствительности регулятора $\Delta=3$ кН. Включен светодиодный индикатор «по умолчанию». Эти значения также будут заданы при нажатии оператором кнопки «Сброс». После включения блока управления активирован ручной режим управления рабочим органом, и включен соответствующий светодиодный индикатор.

Включенный блок управления постоянно выводит значения $P(t)$ и $v(t)$ на панель управления, запоминает и анализирует значения силы сопротивления $P(t)$ за последние 5 секунд для сбора информации о режиме работы машины. Если значения $P(t)$ в течение последних 5 секунд превышают пороговое значение 1 кН, бортовой вычислитель начинает запоминать текущие значения $P(t)$, $v(t)$, $v_m(t)$,

формируя массивы значений показателей тягового режима. Если значения $P(t)$ не превышают 1 кН в течение последних 5 с, рабочий проход автогрейдера в тяговом режиме считается завершенным, прекращается запись значений показателей. Сразу после этого бортовым вычислителем выполняется обработка записанного массива данных. В случае, если в массиве значений $P(t)$ обнаружен квазистационарный процесс длительностью более 30 с, соответствующий установившемуся режиму работы, бортовым вычислителем выполняются следующие действия:

- рассчитываются математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение силы сопротивления, доля времени повышенного буксования и средняя скорость машины;
- табличной интерполяцией определяется оптимальное значение силы сопротивления P_{opt} , которое далее используется в качестве заданного значения P_z вместо значения по умолчанию;
- рассчитанные значения характеристик сигналов индицируются в зоне «Предыдущий проход»;
- оптимальное заданное значение силы сопротивления P_z индицируется в зоне «Настройка»;
- включается светодиодный индикатор «оптимум».

Система управления тяговым режимом автогрейдера предусматривает следующие режимы взаимодействия с человеком-оператором.

1. Режим настройки задатчика и ширины зоны нечувствительности регулятора («Настройка»).

1.1. Оператор при необходимости изменяет предустановленное значение (по умолчанию или оптимальное) силы сопротивления P_z , нажимая кнопки «вверх/вниз». При нажатии на эти кнопки активируется светодиодный индикатор «вручную» вместо «по умолчанию» или «оптимум».

1.2. Аналогично кнопками «вверх/вниз» оператор изменяет ширину зоны нечувствительности для автоматического режима системы. Светодиодные индикаторы на эти кнопки не реагируют. Ширина зоны нечувствительности при настройке должна соответствовать скорости подъема/опускания отвала гидроци-

линдрами, а также скорости машины, чтобы избежать возникновения автоколебаний и добиться приемлемой точности управления.

2. Ручной режим управления рабочим органом без использования ассистента:

- перед рабочим проходом оператор выбирает в зоне «Управление рабочим органом» ручной режим;
- во время рабочего прохода оператор использует кнопки управления рабочим органом для подъема/опускания правой и левой сторон отвала;
- управляющий сигнал с выхода автоматического регулятора не подается на вход коммутатора и панель управления;
- индикация рекомендаций по управлению отвалом отключена.

3. Ручной режим управления рабочим органом с использованием ассистента:

- перед рабочим проходом оператор выбирает ручной режим управления и включает индикацию в зоне «Ассистент»;
- во время рабочего прохода управляющее устройство определяет величину рассогласования между заданным и текущим значениями силы сопротивления на рабочем органе и формирует управляющий сигнал, если рассогласование превышает ширину зоны нечувствительности;
- управляющий сигнал с выхода автоматического регулятора индицируется на панели «Ассистент» в виде стрелок-рекомендаций по управлению отвалом (подъем/стоп/заглубление);
- управляющий сигнал с выхода автоматического регулятора не подается на вход коммутатора;
- оператор использует рекомендации и кнопки управления рабочим органом для подъема/опускания правой и левой сторон отвала.

4. Автоматический режим управления рабочим органом:

- перед рабочим проходом оператор выбирает режим «Автомат»;
- во время рабочего прохода управляющее устройство формирует управляющий сигнал, который с выхода регулятора подается на вход коммутатора;

- управляющие сигналы с выхода коммутатора поступают на светодиодные индикаторы в зоне «Управление рабочим органом»
- если включен ассистент, управляющий сигнал с выхода регулятора также индицируется на панели «Ассистент»;
- система автоматически поддерживает заданное значение силы сопротивления на отвале, одновременно поднимая/заглубляя обе стороны отвала;
- оператор в любой момент может использовать кнопки управления рабочим органом для корректировки высотного и углового положения отвала, при нажатии кнопок выходной сигнал регулятора блокируется коммутатором.

4.5 Оценка экономической эффективности применения системы автоматического управления рабочим органом автогрейдера

Для обоснования целесообразности автоматического управления тяговым режимом по критерию технической производительности необходимо оценить годовой экономический эффект от внедрения системы автоматического управления.

Годовой экономический эффект нового рабочего оборудования рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E} = (Z_{уд.1} - Z_{уд.2}) \cdot B_2, \quad (4.5)$$

где $Z_{уд.1}$, $Z_{уд.2}$ – удельные приведенные затраты потребителя на единицу продукции для базовой и новой техники соответственно;

B_2 - годовая эксплуатационная производительность для новой техники.

Удельные приведенные затраты по базовой или новой технике определим из зависимости

$$Z_{уд} = [S + K(P + E_H)]/B, \quad (4.6)$$

где S – годовые текущие затраты потребителя, связанные с выполнением технологического процесса без учета средств на реновацию техники;

K – капитальные вложения потребителя, связанные с производством, доставкой и монтажом техники;

P – доля отчислений на реновацию;

E_n – нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений;

B – годовая эксплуатационная производительность.

В результате моделирования получены значения часовой технической производительности для тяжелого автогрейдера, работающего в режиме копания грунта: без системы управления $\Pi_{m1} = 621,8 \text{ м}^3/\text{ч}$, с системой управления, настроенной на максимальную производительность $\Pi_{m2} = 681,5 \text{ м}^3/\text{ч}$, настроенной на минимальный удельный расход топлива – $\Pi_{m3} = 605,8 \text{ м}^3/\text{ч}$.

При нормативе времени работы автогрейдера $T_z = 1600 \text{ ч/год}$, коэффициенте перехода от часовой технической производительности к эксплуатационной $K_m = 0,4$, коэффициенте учета простоев $K_n = 0,78$ [118] и условии, что на копание грунта затрачивается 75% времени работы машины, годовая эксплуатационная производительность автогрейдера без системы управления тяговым режимом составит

$$B_1 = \Pi_m \cdot T_r \cdot K_T \cdot K_{np} \cdot 0,75 = 232802 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (4.7)$$

Годовая эксплуатационная производительность автогрейдера с системой автоматического управления тяговым режимом: с максимальной производительностью $B_2 = 255154 \text{ м}^3/\text{год}$, с минимальным удельным расходом топлива $B_2 = 226812 \text{ м}^3/\text{год}$.

При цене неавтоматизированного автогрейдера 3950000 руб. (данные 2018 г.), с учетом затрат на доставку и монтаж машины

$$K_I = 3950000 \cdot 1,09 = 4305500 \text{ руб}. \quad (4.8)$$

По данным НПП «Мера» (www.nppmera.ru), стоимость автоматических систем управления рабочим органом ЗТМ фирмы Trimble составляет \$20000–30000 в зависимости от комплектации. Стоимость датчиков усилий фирмы Hottinger Balduin Messtechnik (Германия) \$2000–4000 (www.hbm.de). Примем ориентировочную стоимость систем управления тяговым режимом ЗТМ \$40000. Тогда капитальные вложения в автоматизированный автогрейдер составят

$$K_2 = (4305500 + 2640000) \cdot 1,09 = 6945500 \text{ руб}. \quad (4.9)$$

Исходя из срока службы оборудования 10 лет, коэффициенты реновации $(P + E_H)=0,2127$. Приведенные удельные затраты для базовой техники $Z_{уд.1}=38,3$ руб/м³.

Данные сметного расчета на разработку грунта составлен на основании «Методики определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации» (МДС 81-35.2004) введенной в действие Постановлением Госстроя России от 05 марта 2004 г. № 15/1.

Стоимость разработки грунта определена в базовом уровне 2001 года (ТЕР-2001 Омской области в редакции 2014 г.) с использованием ПК «Гранд Смета». В территориальных сметных нормативах Омской области редакции 2014 г. оплата труда специалистов, рабочих-строителей и рабочих, управляющих строительными машинами, приведена с учетом районного коэффициента 1,15.

Пересчет в текущий уровень цен произведен с применением индексов пересчета сметной стоимости, рекомендованных ЗАО «Сибирский центр ценообразования в строительстве, промышленности и энергетике» по состоянию на 3 квартал 2018 г. Приведение текущей цены к базисной цене выполнено с применением поправочных индексов к элементам прямых затрат. Индекс изменения оплаты труда рабочих к базовому уровню цен ТСНБ-2001 Омской области редакции 2014 года, составляет $K=24,13$ и определен из расчета оплаты труда основных рабочих в текущем уровне при работе в нормальных условиях труда для среднего четвертого разряда в размере 30159,8 рублей в месяц с учетом районного коэффициента. Нормативы накладных расходов приняты по видам строительных и монтажных работ на основании МДС 81-33.2004г. Нормативы сметной прибыли приняты по видам строительных и монтажных работ на основании МДС 81-25.2001 г.

Для новой техники, согласно (4.6), приведенные удельные затраты для автогрейдера с настройкой системы управления по критерию максимальной производительности $Z_{уд2} = 32,3$ руб/м³, с настройкой системы управления по минимальному удельному расходу топлива $Z_{уд3} = 32,1$ руб/м³.

При оснащении автогрейдера системой управления тяговым режимом с настройкой системы управления по максимальной технической производительности годовой экономический эффект составит

$$\Theta = (38,3 - 32,3) \cdot 255154 = 1530924 \text{ руб.} \quad (4.10)$$

4.6 Рекомендации по расчету эксплуатационных показателей автогрейдера

Результаты имитационного моделирования, оценки производительности и топливной экономичности позволяют предложить планово-производственным подразделениям дорожно-строительных предприятий инженерную методику, позволяющую корректировать нормы расхода топлива и оценивать производительность автогрейдеров в зависимости от условий эксплуатации. Нормы периодически пересматриваются с учетом достигнутых показателей расхода топлива, изменения внутрисменного использования машин по времени и мощности при различных условиях работы. Организации, как правило, сами разрабатывают и утверждают нормы расхода топлива на машины, имеющиеся в эксплуатации, затем производят опытную проверку норм.

Рекомендованная методика (Приложение 3) позволяет уточнить существующую методику оценки расхода топлива, приведенную в методических рекомендациях в строительстве МДС 12-38.2007 на основе СП 12-102-2001, которая используется при расчете норм расхода топлива в дорожно-строительных предприятиях.

Исходной информацией для нормирования расхода топлива по данной методике служат: данные эксплуатационных документов на машины; показатели, характеризующие условия работы машин (коэффициент загрузки двигателя по мощности, условия и режимы работы машины).

Часовая норма расхода топлива машины q_u , кг/маш.-ч, определяется:

$$q_u = q_e N K 10^{-3}, \quad (4.11)$$

где q_e — удельный расход топлива двигателя, г/кВт ч;

N — мощность двигателя машины, кВт;

K — интегральный нормативный коэффициент изменения расхода топлива в зависимости от режимов загрузки двигателя машины (учитывающий условия работы машины в течение смены).

Коэффициент K определяется:

$$K = 1,03 K_B K_M K_{TM} K_{И}, \quad (4.11)$$

где 1,03 — коэффициент, учитывающий расход топлива на запуск и регулировку работы двигателя при ежесменном техническом обслуживании машины;

K_B - коэффициент использования двигателя по времени, при отсутствии фактических значений для данной организации принимается по таблице [93];

K_M - коэффициент использования мощности двигателя, при отсутствии фактических значений для данной организации принимается по таблице [93];

K_{TM} - коэффициент, учитывающий изменение расхода топлива в зависимости от коэффициента использования мощности двигателя (K_M), определяется по [93];

$K_{И}$ - коэффициент, учитывающий износ двигателя, определяется по таблице 3 приложения [93].

Мощность двигателя машины N и удельный расход топлива двигателя q_e принимаются по эксплуатационным документам завода-изготовителя (паспорт, техническая характеристика, инструкция по эксплуатации). Коэффициент K , который состоит из произведения нескольких коэффициентов включая коэффициент K_{TM} , учитывающего изменение расхода топлива, который и корректируется в данной методике. В методических указаниях значение данного коэффициента указано в усредненном виде, и не учитываются затраты топлива, вызванные отступлением от принятой технологии и нарушением рационального режима работы.

На рисунках 4.32–4.33 показаны полученные зависимости технической производительности автогрейдера Π_m и удельного расхода топлива g_n от среднеквадратического отклонения $\sigma\{P\}$ силы сопротивления копания и долю времени повышенного буксования K_δ .

Анализ зависимости коэффициента K_{TM} , учитывающего изменение расхода топлива, от среднеквадратического отклонения силы сопротивления копанию и

доли времени повышенного буксования показал, что значение данного коэффициента берется для усредненных режимов работы и условий эксплуатации.

На этих зависимостях для каждого фактора можно выделить 3 участка, которые характеризуют условия работы автогрейдера. По среднеквадратическому отклонению $\sigma\{P\}$: легкий режим (4000...8000 Н), средний (8000...11000 Н), тяжелый (11000...14000 Н). Для этого необходимо экспертное заключение сотрудника отдела на предстоящий вид работ: планировка или разработка грунта разных категорий. Диапазон K_δ также разбивается на 3 участка, характеризующих условия сцепления движителей с грунтом (хорошее, среднее, плохое). На долю времени повышенного буксования K_δ значительно будут влиять грунтовые условия и износ протектора движителей.

Численные значения удельного расхода топлива g_n и технической производительности автогрейдера P_m представлены в таблицах 4.2–4.3.

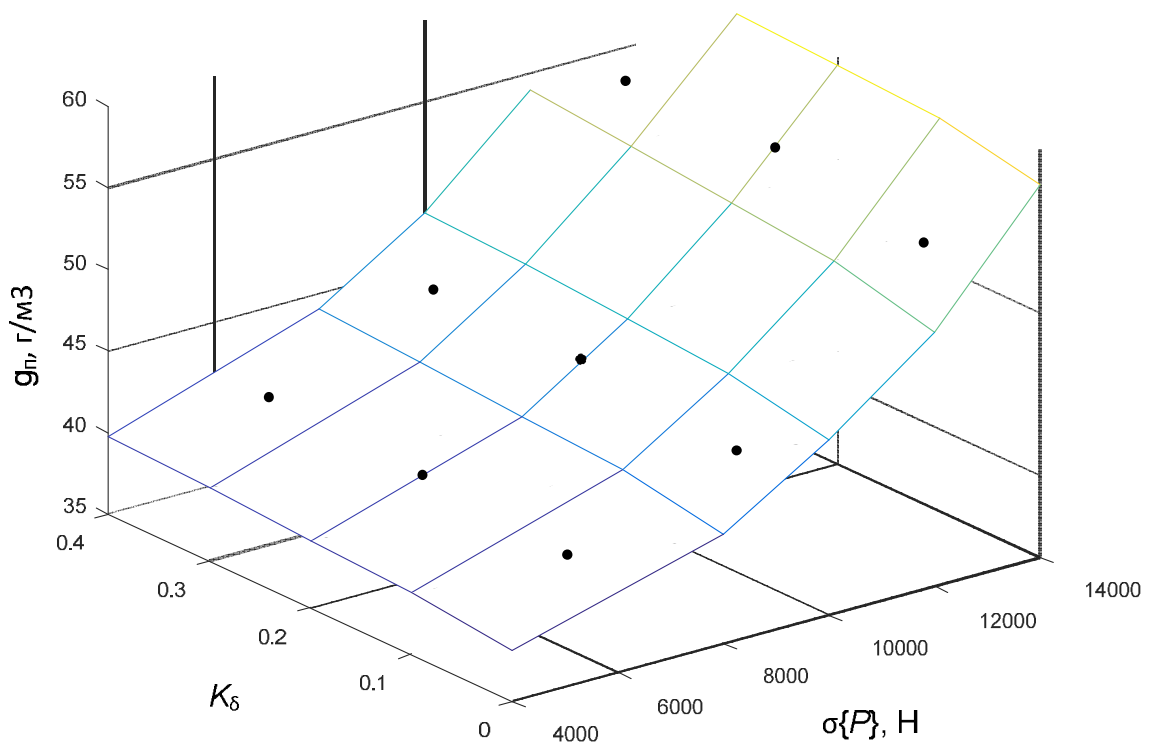


Рисунок 4.32 - Зависимость удельного расхода топлива от среднеквадратического отклонения силы сопротивления копания и доли времени повышенного буксования

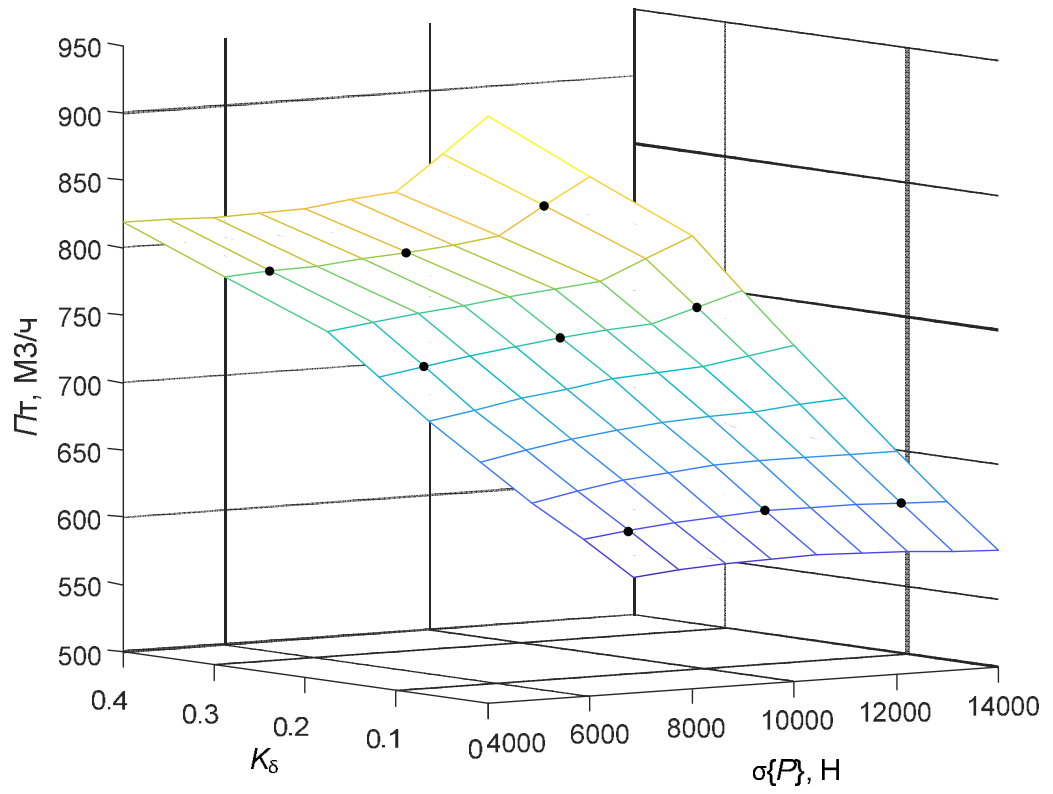


Рисунок 4.33 - Зависимость технической производительности среднеквадратического отклонения силы сопротивления копанью и доли времени повышенного буксования

Таблица 4.2 – Значения удельного расхода топлива g_n в характерных точках

Условия сцепления движителей с грунтом	K_δ	$\sigma\{P\}, \text{ Н}$					
		Режимы работы автогрейдера					
		Легкий		Средний		Тяжелый	
		$\sigma\{P\}=6000 \text{ Н}$		$\sigma\{P\}=9000 \text{ Н}$		$\sigma\{P\}=13000 \text{ Н}$	
		g_n	K_{TM}	g_n	K_{TM}	g_n	K_{TM}
Хорошее	0,05	40,32	0,91	44,29	1,11	54,89	1,33
Среднее	0,2	41,15	0,92	45,33	1,14	56,12	1,35
Плохое	0,35	41,7	0,94	45,94	1,15	56,76	1,37

Таблица 4.3 – Значения технической производительности Π_m в характерных точках

K_δ	$\sigma\{P\}, \text{ Н}$		
	$\sigma\{P\}=6000$	$\sigma\{P\}=9000$	$\sigma\{P\}=13000$
0,05	858,92	775,95	619,66
0,2	810,1	738,50	599,74
0,35	781,73	702,99	569,90

Значение коэффициента, учитывающего изменение расхода топлива K_{TM} равный 1,14, взят для среднего значения расхода топлива $45,33 \text{ г/м}^3$ (таблица 4.1), что соответствует значениям среднеквадратического отклонения силы сопротивления копания $\sigma\{P\}=9000 \text{ Н}$ и доле времени повышенного буксования $K_\delta=0,2$. При анализе всех режимов работы значение данного коэффициента в процентном соотношении может значительно изменяться. Так, например, при загрузке $\sigma\{P\}=13000 \text{ Н}$ и $K_\delta=0,35$ значение K_{TM} изменится на 20,1% и составит 1,37, при этом значение технической производительности Π_m снизится на 22,8% (рисунок 4.33, таблица 4.3). Численные значения коэффициента K_{TM} , учитывающего изменение расхода топлива для всех режимов работы, приведены в таблице 4.2.

4.7 Выводы по главе

1. В результате вычислительных экспериментов на имитационной модели тягового режима автогрейдера получены реализации случайных процессов. Определены статистические характеристики (математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение) показателей тягового режима: координат рабочего органа, глубины резания, силы сопротивления на рабочем органе, крутящего момента двигателя, скорости машины, коэффициента буксования, тяговой мощности. Для реализаций рабочих процессов рассчитаны значения критериев эффективности: технической производительности и удельного расхода топлива.

2. Множеству значений варьируемых параметров управляющего устройства, гидропривода, буксования и случайных возмущений поставлено в соответствие множество значений математического ожидания силы сопротивления $M\{P\}$, среднеквадратического отклонения $\sigma\{P\}$, доли времени повышенного буксования K_δ и технической производительности Π_m (критерий оптимальности). Анализ зависимостей между этими величинами позволяет обосновать рациональные параметры тягового режима.

3. Получены полиномиальные модели зависимостей $\Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\}, K_\delta)$, которые использованы для определения оптимальных значений $M\{P\}$, т.е. рекомендуемых значений поддерживаемой силы сопротивления на рабочем органе P_3 .

4. Выполнено сравнение альтернативных критериев эффективности рабочего процесса Π_m и удельного расхода топлива на единицу объема грунта g_n . Критерий технической производительности Π_m является более чувствительным к изменениям $M\{P\}$, поэтому он выбран для оптимизации тягового режима.

5. Получена зависимость оптимального поддерживаемого значения силы сопротивления на рабочем органе $P_3 = P_{opt}$ от среднеквадратического отклонения силы сопротивления копанию $\sigma\{P\}$ и доли времени повышенного буксования K_δ . Эта зависимость лежит в основе рекомендаций по выбору рациональных параметров тягового режима автогрейдера.

6. При оптимальном поддерживаемом значении силы сопротивления на рабочем органе получены зависимости критериев Π_m и g_n от среднеквадратического отклонения силы сопротивления копания $\sigma\{P\}$ и доли времени повышенного буксования K_δ . Эти зависимости показывают экстремальные значения критериев при рациональных значениях параметров тягового режима.

7. Предложена структура системы управления рабочим органом автогрейдера, в которой управляющее устройство содержит формирователь задающего воздействия (ФЗВ). ФЗВ задает значение поддерживаемой силы сопротивления на рабочем органе, оптимальное по критерию технической производительности.

8. Разработаны рекомендации по проектированию системы управления рабочим органом автогрейдера в тяговом режиме, в том числе функций блока управления, режимов функционирования системы и взаимодействия с человеком-оператором. Предусмотрен режим ассистента для поддержания рекомендуемого значения силы сопротивления на рабочим органе при ручном управлении отвалом.

9. Выполнена оценка экономического эффекта от предполагаемого внедрения системы управления рабочим органом автогрейдера. Годовой экономический эффект составит 1530924 руб.

10. Разработаны рекомендации сотрудникам планово-производственного отдела предприятия по расчету эксплуатационных показателей тяжелого автогрейдера. Внедрена методика оценки производительности и расчета расхода топлива при различных условиях работы с обоснованием значения коэффициента K_{TM} , учитывающего изменение расхода топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы по работе

1. Разработана структура модели тягового режима автогрейдера. Управляемой величиной является сила сопротивления копанию на рабочем органе $P(t)$. Критерием эффективности управления рабочим органом автогрейдера является техническая производительность $П_m$. Топливная экономичность учтена с помощью критерия удельного расхода топлива на единицу объема вырезанного грунта g_n .

2. Для моделирования тягового режима тяжелого автогрейдера модернизированы модели следующих подсистем:

- модель формирования случайных возмущающих воздействий от микро-рельефа поверхности земляного полотна и неоднородности грунта;
- модель гидропривода рабочего органа и автоматического регулятора;
- модель геометрии автогрейдера и позиционирования рабочего органа;
- модель формирования призмы волочения;
- модель формирования случайной силы сопротивления на рабочем органе автогрейдера;
- модель буксования движителей.

3. Разработана новая модель динамики привода автогрейдера. Численное решение системы нелинейных уравнений позволяет использовать нелинейные регуляторные характеристики двигателя и значения коэффициента буксования, заданные таблично (например, на основе экспериментальных данных).

4. Разработаны новые регрессионные модели, аппроксимирующие оцифрованную многопараметровую характеристику двигателя. Модели позволяют использовать зависимости удельного расхода топлива и мощности двигателя от крутящего момента и угловой скорости.

5. Выполнена программная реализация имитационной модели тягового режима тяжелого автогрейдера, предназначенная для проведения вычислительных

экспериментов и получения статистических характеристик показателей тягового режима.

6. Выполнен автоматизированный сбор экспериментальных данных о показателях рабочего процесса тяжелого автогрейдера ДЗ-98В1 в динамике. Получены показатели тягового режима: сила сопротивления копанию P , теоретическая скорость машины v_m , действительная скорость машины v , коэффициент буксования колесных движителей δ , тяговая мощность автогрейдера N . Расхождения математического ожидания и среднеквадратического отклонения показателей тягового режима, полученных экспериментально и на модели, не превышают 15%, что показывает приемлемую точность модели тягового режима. Методика цифровой обработки информации внедрена в образовательный процесс ФГБОУ ВО «СибАДИ».

7. Выполнен анализ зависимости коэффициента буксования от времени. Выявлены интервалы времени, на которых происходит резкое возрастание $\delta(t)$. Участки грунтовой поверхности, на которых движители «срываются» в режим повышенного буксования при относительно небольших значениях $P(t)$, предлагается учитывать с помощью введенного показателя рабочего процесса «доля времени повышенного буксования» K_δ .

8. В результате исследований тягового режима автогрейдера на имитационной модели получены реализации случайных процессов. Определены статистические характеристики показателей тягового режима: координат рабочего органа, глубины резания, силы сопротивления на рабочем органе, крутящего момента двигателя, скорости машины, коэффициента буксования, тяговой мощности. Получены полиномиальные модели зависимостей $\Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\}, K_\delta)$, которые использованы для определения оптимальных значений поддерживаемой силы сопротивления на рабочем органе.

9. Получена зависимость оптимального поддерживаемого значения силы сопротивления на рабочем органе $P_3 = P_{opt}$ от среднеквадратического отклонения силы сопротивления копанию $\sigma\{P\}$ и доли времени повышенного буксования K_δ .

Эта зависимость лежит в основе рекомендаций по выбору рациональных параметров тягового режима автогрейдера.

10. Предложена структура системы управления рабочим органом автогрейдера, в которой управляющее устройство содержит формирователь задающего воздействия (ФЗВ). ФЗВ задает значение поддерживаемой силы сопротивления на рабочем органе, оптимальное по критерию технической производительности. Разработаны рекомендации по проектированию системы управления, в том числе функций блока управления, режимов функционирования системы и взаимодействия с человеком-оператором.

11. Разработаны рекомендации сотрудникам планово-производственного отдела предприятия по расчету эксплуатационных показателей тяжелого автогрейдера. В АО «ГК «Северавтодор» внедрена методика оценки производительности и расчета расхода топлива при различных условиях работы с обоснованием значения коэффициента K_{TM} , учитывающего изменение расхода топлива.

Выполнена оценка годового экономического эффекта от предполагаемого внедрения системы управления рабочим органом автогрейдера: 1530924 руб.

Перспективы использования результатов диссертационного исследования заключаются в применении методики оценки производительности и расхода топлива на предприятиях, эксплуатирующих тяжелые автогрейдеры. Направление дальнейших исследований по теме диссертации состоит в создании системы управления рабочим органом автогрейдера на основе разработанных алгоритмов функционирования управляющего устройства в режимах ассистента и автоматического управления отвалом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автомобильные дороги: Автоматизация производственных процессов в строительстве: Учебник для вузов/ Л. Я. Цикерман, В. И. Марсов, Г. И. Асмолов и др.; Под ред. Л. Я. Цикермана.– 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Транспорт, 1986.– 238 с.
2. Агеев Л. Е. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов. – М.: Колос, 1978. – 256 с.
3. Алексеева Т. В. Гидропривод и гидроавтоматика землеройно-транспортных машин: Исследование и основы расчета. – М.: Машиностроение, 1966. – 147 с.
4. Алексеева Т. В. Разработка следящих систем управления рабочим процессом землеройно-транспортных машин с целью повышения их эффективности.– Омск, 1974.– 175 с.
5. Амельченко В. Ф., Денисов В. П., Мещеряков В. А. Исследование устойчивости двухканальной системы управления рабочим органом автогрейдера// Известия вузов. Строительство. – 1999. – № 10. – С. 81–85.
6. Амельченко В. Ф. Управление рабочим процессом землеройно-транспортных машин. – Омск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1975. – 232 с.
7. Амельченко В. Ф., Денисов В. П. Учет влияния глубины резания при определении оптимального объема призмы волочения поворотного отвала// Известия вузов. Строительство. – № 9. – 1996.
8. Амельченко В. Ф., Денисов В. П., Мещеряков В. А. Исследование систем стабилизации высотной координаты рабочего органа автогрейдера// Известия вузов. Строительство. – 1999. – № 2–3. – С. 108–111.
9. Ануфриев И. Е., Смирнов А. Б., Смирнова Е. Н. MATLAB 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
10. Арбатский Э. А. Исследование и обоснование параметров системы стабилизации тяговой мощности гусеничного бульдозера с гидромеханической трансмиссией: Дис. ... канд. техн. наук. – Омск: СибАДИ, 1982. – 198 с.

11. Артемьев К. А. Теория резания грунтов землеройными машинами: Уч. пособие.– Новосибирск: НИСИ, 1978.– 104 с.
12. Архангельский В.М., Вихерт М.М., Воинов А.Н. Автомобильные двигатели. - М.: Машиностроение, 1977. - 591 с.
13. Багиров Д. Д., Златопольский А. В. Двигатели внутреннего сгорания строительных и дорожных машин. – М.: Машиностроение, 1974. – 220 с.
14. Баловнев В. И. Дорожно-строительные машины с рабочими органами интенсифицирующего действия.– М.: Машиностроение, 1981.– 223 с.
15. Баловнев В. И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин.– М.: Машиностроение, 1994.– 432 с.
16. Баловнев В. И., Кудайбергенов Р. Х. Статистические модели грунтовых условий как основа для определения технических параметров землеройных машин// Строительные и дорожные машины.– 1977. – № 2. – С. 13–17.
17. Баловнев В. И., Хмара Л. А. Интенсификация разработки грунтов в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1993.– 383 с.
18. Барский И. Б., Аналович В. Я., Кутьков Г. Н. Динамика трактора. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
19. Бандаков Б.Ф., Автогрейдеры. – М.: Транспорт, 1988.– 301 с.
20. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования.– М.: Наука, 1972.– 768 с.
21. Вебер В.В., Методика оценки влияния параметров тягового режима автогрейдера на техническую производительность и удельный расход топлива. В сборнике: Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ». Омск, 2021. С. 8-11.
22. Ветров Ю. А. Резание грунтов землеройно-транспортными машинами.– М.: Машиностроение, 1971.– 360 с.

23. Волобоев В. Г. Основы теории оптимального проектирования пространственных конструкций землеройных и землеройно-транспортных машин: Дис. ... докт. техн. наук. – Омск, СибАДИ, 2003. – 361 с.
24. Глушеч В.А. Математическая модель рабочего процесса рыхлительного агрегата / Дорожно-транспортный комплекс, экономика, экология, строительство и архитектура: Материалы Международной научно-практической конференции. Книга 2. - Омск: Изд-во СибАДИ, 2003. - с. 250 - 253.
25. Денисов В. П., Матяш И. И., Зубарев К. В. Исследование влияния конструктивных параметров рабочего органа автогрейдера на его производительность // Вестник СибАДИ, 2015, № 2 (42), с. 15–19.
26. Денисов В. П., Мещеряков В. А. Оценка качества выполняемых автогрейдером профилировочных работ// Машины и процессы в строительстве: Сб. науч. тр. № 3 – Омск: Изд-во СибАДИ, 2000. – С.130–134.
27. Денисов В.П., Мещеряков В.А. Исследование системы автоматического управления скоростью автогрейдера // Строительные и дорожные машины, 2003, № 5, с. 39–41. EID: 2-s2.0-0038691599
28. Денисов В. П. Аналитический метод определения математического ожидания и дисперсии тяговой мощности землеройно-транспортной машины// Машины и процессы в строительстве: Сб. науч. тр. № 5 – Омск: Изд-во СибАДИ, 2004. – С. 178–184.
29. Денисов В. П. Оптимизация загрузки двигателя землеройно-транспортной машины на основе векторного критерия оценки тяговой мощности// Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ). – Омск: Издательский дом «ЛЕО», 2004. – Вып. 1. – С. 194–196.
30. Денисов В. П. Оптимизация рабочего процесса землеройно-транспортных машин с учетом случайного характера нагрузок: Монография.– Омск: Изд-во СибАДИ, 2005. – 123 с.
31. Денисов В. П. Оптимизация тяговых режимов землеройно-транспортных машин: Дис... докт. техн. наук.– Омск, СибАДИ, 2006. – 259 с.

32. Денисов В. П. Повышение производительности автогрейдера стабилизацией тяговой мощности: Дис... канд. техн. наук.– Омск, СибАДИ, 1992. – 204 с.
33. Денисов В. П. Статистическое обоснование выбора режима работы привода землеройно-транспортной машины// Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ). – Омск: Издательский дом «ЛЕО», 2005. – № 1 (2). – С. 184–188.
34. Денисов В. П., Мещеряков В. А. Основы автоматизированного мониторинга строительных процессов: Отчет о НИР (заключит.)/СибАДИ. – № ГР 01980006081; Инв. № 02200002398. – Омск, 1999. – 64 с.
35. Денисов В. П., Мещеряков В. А. Предпосылки проектирования системы автоматического управления скоростью автогрейдера// Образование и социально-экономические проблемы современного общества: Сб. науч. тр. Омского института предпринимательства и права; Под ред. А.И. Барановского. – Омск: Изд-во «Прогресс» Омского института предпринимательства и права, 2002. – С. 227–229.
36. Домбровский Н. Г. и др. Землеройно-транспортные машины. – М.: Машиностроение, 1965. – 234 с.
37. 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.
38. Дьяконов В. Matlab 6.5 SP1/ 7.0+Simulink 5/6: Обработка сигналов и проектирование фильтров – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576с.
39. Есаков, А.Е. Методика создания алгоритмов для систем управления фрикционными сцеплениями автомобильных автоматических трансмиссий: дис. ... канд. техн. наук / Есаков А.Е – Москва, 2010. – 161с.
40. Жулай В.А., Тюнин В.Л., Крестников А.В. Оценка топливной экономичности самоходных колесных землеройно-транспортных машин // Механизация строительства, 2016, т. 77, № 8, с. 27–31.
41. Жулай В.А. Зависимость буксования колесного движителя от силы тяги / В.А. Жулай, В.И. Енин, Е.В. Кожакин // Тракторы и сельхозмашины .— 2015 .— №1 .— С. 50-51 .— URL: <https://rucont.ru/efd/349310> (дата обращения: 27.05.2022)

42. Завьялов А. М. Основы теории взаимодействия рабочих органов дорожно-строительных машин со средой: Дис... д-ра.техн. наук. – Омск: СибАДИ, 1999. – 252 с.
43. Зеленин А. Н., Баловнев В. И., Керов И. П. Машины для земляных работ/ Под ред. А. Н. Зеленина. – М.: Машиностроение, 1975. – 424 с.
44. Исследование одномассовой модели автогрейдера в режиме перемещения грунта / В.П. Денисов, В.А. Мещеряков, И.И. Матяш // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2001. – Вып. 4. Ч. 4.- С. 59-64.
45. Келлер, А.В. Повышение проходимости автомобиля с межколесным дифференциалом ограничение буксования ведущих колес: дис. ... канд. техн. наук / Келлер А.В. – Челябинск, 1999. – 136с.
46. Кононов, А.А. К вопросу взаимодействия основного отвала автогрейдера с разрабатываемым грунтом / А.А.Кононов // Изв.вузов. Строительство. 2006. - № 11-12. - С. 68 - 72.
47. Кононов, А.А. К вопросу моделирования работы автогрейдера при разработке грунта основным отвалом / А.А.Кононов // Изв.вузов. Строительство. 2006. - № 5. - С. 88 - 90.
48. Кононыхин Б. Д. Автоматизация землеройных процессов в дорожном строительстве: идентификация, автокоординирование, управление: Дис... д-ра.техн. наук. – М., 1989. – 428 с.
49. Кононыхин Б. Д. Динамические модели режимов нагружения землеройно-транспортных машин // Механизация строительства. – 2005. – № 4.
50. Кононыхин Б. Д. Лазерные системы управления машинами дорожного строительства.– М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
51. Костин А. К., Пугачев Б. П., Кочинев Ю. Ю. Работа дизелей в условиях эксплуатации: Справочник. – Л., Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 284 с.
52. Кологривов В.Н. Эффект Доплера в классической физике: учебно-методическое пособие по курсу Общая физика. – М.: МФТИ, 2012. – 32с.
53. Кутьков Г. М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства. – М.: КолосС, 2004. – 504 с.

54. Кутьков Г. М. Тяговая динамика тракторов. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.
55. Лихачев, Д.С. Особенности вибронагруженности и пути снижения крутильных колебаний в трансмиссии автомобиля с комбинированной установкой: дис. ... канд. техн. наук / Лихачев Д.С.– Москва, 2017. – 144с.
56. Матяш И. И. Повышение производительности автогрейдера при перемещении грунта: Дис... канд. техн. наук. – Омск: СибАДИ, 2001. – 158 с.
57. Машины для земляных работ: Учебник/ Н. Г. Гаркави, В. И. Аринченков, В. В. Карпов и др. – М.: Высш. школа, 1982. – 335 с.
58. Мещеряков В. А. Динамическая модель формирования призмы волочения поворотного отвала землеройно-транспортной машины // Известия вузов. Строительство. – 2007. – № 7.
59. Мещеряков В. А. Нейросетевое адаптивное управление тяговыми режимами землеройно-транспортных машин: Монография. – Омск: ОмГТУ, 2007. – 219 с.
60. Мещеряков В. А. Устойчивость систем автоматического управления рабочим органом автогрейдера. – Омск, СибАДИ, 1998. – 14 с. – Деп. ВИ-НИТИ 04.12.98, № 3554-В98.
61. Мещеряков В.А., Вебер В.В. Динамическая модель привода землеройно-транспортной машины с механической трансмиссией // Механизация строительства. – 2007. – №10. – С. 27–29.
62. Мещеряков В.А., Вебер В.В. Оптимизация задающего воздействия для системы управления тяговым режимом автогрейдера. Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ". 2018;15(4):502-513. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-4-502-513>.
63. Мещеряков В. А., Вебер В. В. Динамический анализ рабочего оборудования автогрейдера с применением САД/САЕ-технологий // Межвузовский сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов. – Омск: СибАДИ, 2004. – Вып. 1, ч. 1. – С. 141–146.

64. Мещеряков В. А., Вебер В. В. Реализация модели рабочего процесса автогрейдера в MATLAB/Simulink // Труды Всероссийской научной конференции «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB». — СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2007. — С. 711–716.

65. Мещеряков В. А., Вебер В. В. Двухмассовая динамическая модель привода автогрейдера с механической трансмиссией // Материалы 63-й научно-технической конференции ГОУ «СибАДИ». — Омск: СибАДИ, 2009. — Кн. 1. — С. 255–258.

66. Мещеряков В. А., Вебер В. В. Результаты экспериментальных исследований рабочего процесса автогрейдера ДЗ-98 // Материалы Всероссийской 65-й научно-технической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием). — Омск: СибАДИ, 2011. — Кн. 2. — С. 393–397.

67. Мещеряков В.А., Вебер В.В. Оценка эффективности применения системы автоматического управления тяговым режимом автогрейдера. Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс] : сборник материалов III Международной научно-практической конференции 29–30 ноября 2018 г. — Электрон. дан. — Омск, СибАДИ 2019. — Режим доступа <https://cloud.sibadi.org/index.php/s/9580hVmхоObRoTF>, свободный после авторизации. — Загл. с экрана. С. 77–81.

68. Мещеряков В. А., Денисов В. П., Денисова Л. А. Введение в методы математического программирования. Компьютерный практикум в среде MATLAB: Учебное пособие. — Омск: Полиграфический центр КАН, 2013. — 142 с.

69. Мещеряков В. А. Повышение точности управления рабочим органом автогрейдера на профилировочных работах: Автореф... дис. канд. техн. наук. — Омск, СибАДИ, 1999. — 20 с.

70. Мещеряков В.А., Вебер В.В. Методика обработки результатов экспериментальных исследований тягового режима автогрейдера // Вестник СибАДИ, 2012, № 4 (26), с. 14–19.

71. Мещеряков В.А., Вебер В.В. Проектирование блока управления и обоснование режимов функционирования системы управления рабочим органом автогрейдера // Научно-практический сетевой электронный журнал «Техника и технологии строительства», 2022, № 1 (29), с. 11–17. <https://tcc.sibadi.org/arhiv-nomerov/>
72. Недорезов И. А. и др. Вероятностный анализ усилий в рабочем оборудовании землеройных машин// Строительные и дорожные машины. – 1971. – № 8. – С. 10–12.
73. Недорезов И. А. Исследование копания грунта отвалом автогрейдера: Дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1958.– 195 с.
74. Недорезов И. А., Машкович О. Н., Спивак С. Г. Машины и механизмы транспортного строительства. – М.: Машиностроение, 1989.
75. Никулин Е. А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем/ Учеб.пособие для вузов.– СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 640 с.
76. Никулин П.И., Бузин Ю.М. Анализ методов управления процессом копания грунта землеройно-транспортных машин // Известия высших учебных заведений. Строительство, 2003, № 11 (539), с. 95–99.
77. Палеев В.А., Гидромеханические системы стабилизации положения рабочего органа строительных и дорожных машин: монография / В.А. Палеев-Омск.: СибАДИ, 2013. - 128 С.
78. Попов Е. П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1979.– 256 с.
79. Официальный сайт компании «TOPCON» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://topcon.pro/stroitelstvo/resheniya_dlya_greyderov_3D_LPS, свободный. – Заглавие с экрана (дата обращения к ресурсу 24.05.2022).
80. Официальный сайт компании «БЕЛГИДРОСИЛА ГРУПП» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Официальный сайт компании «БЕЛГИДРОСИЛА ГРУПП» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://belgidrosila.ru/sistemy-nivelirovaniya>, свободный. – Заглавие с экрана (дата обращения к ресурсу 24.05.2022).

81. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ/ Под ред. Е. Ю. Малиновского. – М.: Машиностроение, 1980.– 216 с.
82. Ронинсон Э. Г. Автогрейдеры. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986.– 222 с.
83. Сафонов, Б.А. Автоматизация управления муфтами блокировки дифференциалов в трансмиссии многоосной колесной машины: дис. ... канд. техн. наук / Сафонов Б.А. – Москва, 2017. – 118 с.
84. Севров К. П., Горячко Б. В., Покровский, А. А. Автогрейдеры. Конструкция, теория, расчет.– М.: Машиностроение, 1970.– 192 с.
85. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
86. Скибарко, Д.С. Разработка алгоритмов микропроцессорного управления дизельным двигателем: дис. ... канд. техн. наук / Скибарко Д.С.– Нижний Новгород, 2001. – 115с.
87. Скловский А. А. Автоматизация строительно-дорожных машин: Справочник. – Рига: Авотс, 1990. – 237 с.
88. Скотников В. А., Машенский А. А., Солонский А. С. Основы теории и расчета трактора и автомобиля. – М.: Агропромиздат, 1986. – 383 с.
89. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
90. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: Учеб.для вузов – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
91. Способ управления рабочим органом землеройно-транспортной машины: А.с. 1488403 СССР, МКИ Е 02 F 3/76/ В. Ф. Амельченко, В. П. Денисов// БИ. – № 23. – 1989.
92. Справочник конструктора дорожных машин/ Под ред. И. П. Бородачева. – М.: Машиностроение, 1965. – 725 с.
93. СП 12-102-2001: Механизация строительства. Расчет расхода топлива на работу строительных и дорожных машин.

94. 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.

95. Судник Ю. А., Петков Д. И., Витков В. Т. Автоматизированные системы мобильных агрегатов// Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1997. – № 2. – С. 19–22.

96. Тарасик, В.П. Интеллектуальные системы управления автотранспортным средствами: монография / В.П. Тарасик, С.А. Рынкевич. – Минск : УП Технопринт, 2004. – 512 с.

97. Тарасов В. Н. Динамика систем управления рабочими процессами землеройно-транспортных машин.– Омск: Зап.-сиб. кн. изд-во, 1975.– 182 с.

98. Теория автоматического управления: Нелинейные системы, управления при случайных воздействиях: Учебник для вузов/ А. В. Нетушил, А. В. Балтрушевич, В. В. Бурляев и др.; Под ред. А. В. Нетушила.– 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Высш. шк., 1983.– 432 с.

99. Теория автоматического управления: Учебник для вузов. В 2-х ч. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления/ Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова и др.; Под ред. А. А. Воронова. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.

100. Теория автоматического управления: Учебник для вузов. В 2-х ч. Ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления/ А. А. Воронов, Д. П. Ким, В. М. Лохин и др.; Под ред. А. А. Воронова. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1986. – 504 с.

101. Титенко В.В. Повышение производительности автогрейдера, выполняющего планировочные работы, совершенствованием системы управления: Дис. канд. техн. наук. Омск, СибАДИ, 1997. — 172 с.

102. Техничко-эксплуатационные характеристики машин фирмы Caterpillar: Справочник. – Издание Caterpillar Inc., Пеория, Иллинойс, США, 2000. – 1095 с.

103. Тракторы. Теория: Учебник для студентов вузов по спец. «Автомобили и тракторы»/ Под общ.ред. В. В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1988.– 376 с.

104. Тургиев А. К. Повышение эффективности технологических процессов на основе улучшения тягово-сцепных свойств колесных тракторов при колебательной нагрузке: Автореферат дисс. ... д-ра техн. наук. – Рязань, 1999. – 86 с.

105. Третьяков, А.А. Автоматизированная оценка адаптивной системы управления транспортным дизелем и повышение её точности и быстродействия: дис. ... канд. техн. наук / Третьяков А.А.– Ярославль, 2011. – 157с.

106. Ульянов Н.А. Колесные движители строительных и дорожных машин. Теория и расчет. – М.: Машиностроение, 1982. – 279 с.

107. Ульянов Н.А., Ронинсон Э.Г. Самоходные колесные землеройно-транспортные машины. Под ред. Ульянова. – М.: Машиностроение, 1976.-359с.

108. Ульянов Н. А. и др. Самоходные колесные землеройно-транспортные машины. – М.: Машиностроение, 1982. – 280 с.

109. Ульянов Н. А. Основы теории и расчета колесного движителя землеройных машин. – М.: Машгиз, 1962. – 208 с.

110. Ульянов Н. А. Теория самоходных колесных землеройно-транспортных машин. – М.: Машиностроение, 1969. – 520 с.

111. Федоров Д. И. Рабочие органы землеройных машин.– М.: Машиностроение, 1990.– 360 с.

112. Федоров Д. И., Бондарович Б. А. Надежность рабочего оборудования землеройных машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 230 с.

113. Холодов А. М. Основы динамики землеройно-транспортных машин. – М.: Машиностроение, 1968. – 156 с.

114. Холодов А. М., Ничке В. В., Назаров Л. В. Землеройно-транспортные машины. – Харьков: Вища школа, 1982. – 192 с.

115. Холодов А. М., Руднев В. К. и др. Проектирование машин для земляных работ/ Под ред. А.М. Холодова. – Харьков: Вища школа, 1986.

116. Цифровое моделирование систем стационарных случайных процессов/ Гридина Е. Г., Лебедев А. Н., Недосекин Д. Д., Чернявский Е. А. – Л., 1991. – 144 с.
117. Черных И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений/ Под общ.ред. В. Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.
118. Шмаков А. Т. Эксплуатация дорожных машин: Учебник для техникумов.– 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Транспорт, 1987.– 398 с.
119. Щербаков В. С. Научные основы повышения точности работ, выполняемых землеройно-транспортными машинами: Дис... д-ра техн. наук. – Омск: СиБАДИ, 2000. – 416 с.
120. AccuGrade GPS Grade Control System. – Caterpillar, 2005. – 6 p.
121. Blade Assembly: United States Patent 4369847/ Mizunuma W. (Japan). – 4 p.
122. Braselton J 2016 Curve Fitting with MATLAB. Linear and Non Linear Regression. Interpolation: Createspace Independent Publishing Platform, United States, 202 p.
123. Bulgakov A, Emelianov S, Bock T and Tokmakov G 2016 Adaptive control of bulldozer's workflows: Proceedings of the 33rd ISARC, Auburn, AL, USA. P. 90-97.
124. Denisova L and Meshcheryakov V 2017 The software and hardware complex for automatic feed control of steam generators: modeling and optimization: IESM 2017 Conference Proceedings: International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, pp. 117–122.
125. Klets D, KrasnokutskyM, Hatsko V and Barun M 2017 Modeling of operation processes of a motor grader engine during work under unsteady load: Eastern-European Journal of Enterprise Technologies vol. 4, No 7 (88).
126. Mathews J and Fink K 2004 Numerical Methods Using Matlab (4th Edition), Pearson, 696 p.
127. Song Q, Wand W, Jia C et al 2016 Research on fuel consumption of hybrid bulldozer under typical duty cycle: The 2015 International Conference on Mechanical Engineering and Control Systems (MECS2015)

128. Steckelberg D and Pacifico A 2015 A methodology for measuring an internal combustion engine performance map using on-board acquisition: 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering (Rio de Janeiro, Brazil)

129. Togun N K and Baysec S 2010 Prediction of torque and specific fuel consumption of a gasoline engine by using artificial neural networks: *Applied Energy* 87, pp. 349–355.

130. Ye M and Lin T 2015 Energy conservation for a motor grader by shifting the engine power curve based on fuzzy adaptive control: *Advances in Mechanical Engineering* vol. 7, issue 4.

131. Zhao R Y and Wang X 2012 Research on power adaptive control method for hydraulic motor grader based on Simulink/AMESim: *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 135-136, pp. 793-799.

132. Zhulai V, Yenin V and Krestnikov A 2011 Mathematical description of speed characteristics of engines of building and road machines: *Scientific newsletter of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering*, vol.1, pp. 196-200.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1



18 августа 2010 г.

г. Омск

В ООО «ТК «БеконАвтоТранс» в период с 15 июня по 18 августа 2010 г. проводились экспериментальные исследования автогрейдера ДЗ-98-В1 с использованием бортового измерительного комплекса.

1 ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

1. Сбор экспериментальных данных о показателях рабочего процесса автогрейдера ДЗ-98-В1 в динамике.
2. Подтверждение адекватности математической модели тягового режима автогрейдера ДЗ-98-В1.

2 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

В качестве объекта исследования принят тяговый режим автогрейдера тяжелого класса ДЗ-98-В1 с механической трансмиссией. Для проведения эксперимента автогрейдер оснащен датчиками: на шкворень тяговой рамы установлены тензодатчики для измерения силы сопротивления на рабочем оборудовании; на заднем колесе установлен датчик частоты вращения; сзади машины установлен датчик действительной скорости «пятое колесо». С целью измерения показателей рабочего процесса в динамике автогрейдер ДЗ-98-В1 оснащен бортовым измерительным комплексом (см. п.3).

3 СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ

Для измерения показателей рабочего процесса на автогрейдер ДЗ-98-В1 установлено регистрирующее оборудование в следующем составе.

1. Бортовой измерительный комплекс (БИК) с модульной системой измерения на базе крейт-контроллера и персонального компьютера (изготовитель ФГУП «НАТИ», г. Москва), включающий следующие компоненты:
 - 1.1. Персональный компьютер-ноутбук с программным обеспечением БИК.
 - 1.2. Крейт L-Card с аналого-цифровыми преобразователями (АЦП):
 - шасси LTC-26, контроллер LC-014, блок питания на 12 В;
 - модуль АЦП LC-111DP (универсальный до $\pm 10В$ по 16/32 каналам).
 2. Коробка коммутационная с клеммными колодками DB-37F (разводка сигнальных кабелей на датчики и модули АЦП).
 3. Две аккумуляторные батареи 12 В 190 А·ч:
 - для питания крейта;
 - для питания ноутбука и усилителя сигнала тензодатчиков.

4. Преобразователь напряжения Porto HT-E-150 DC/AC Power Inverter 12 В/220 В.
5. Усилитель сигнала тензодатчиков 4-канальный.
6. Кабель сигнальный (экранированная витая пара, коаксиальный).
7. Датчик усилия (тензозвено, полумостовая схема подключения), предварительно проградуированный на лабораторном гидравлическом прессе.
8. Датчик угловой скорости ведущего колеса автогрейдера, состоящий из зубчатого колеса и магниторезистивных переключателей 1GT101DC с элементами питания.
10. Датчик действительной скорости машины «пятое колесо» (формирователь импульсов на основе зубчатого колеса и датчика 1GT101DC).
11. Тележка для установки измерительной аппаратуры.

4 УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Для проведения испытаний был выбран горизонтальный прямолинейный участок грунтовой дороги длиной 100 м. Грунт II категории (супесь). Работа велась на первой передаче трансмиссии с включенным передним мостом. Выполнен рабочий проход – зарезание и перемещение грунта основным отвалом. Во время резания и перемещения грунта в реальном времени снимались показания датчиков и записывались на жесткий диск компьютера. Весь процесс снимался на видеокамеру и фотоаппараты. Угол резания составлял 40° , угол захвата - 50° .

5 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

В ходе эксперимента в динамике измерены следующие параметры рабочего процесса автогрейдера ДЗ-98-В1:

- усилие сопротивления копанию (горизонтальная составляющая силы сопротивления копанию грунта);
- теоретическая и действительная скорости машины, на основе которых определен коэффициент буксования.

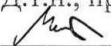
6 ВЫВОДЫ

1. Получены экспериментальные данные о показателях рабочего процесса автогрейдера в динамике.

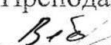
2. Измеренные значения показателей рабочего процесса использованы для получения экспериментальных зависимостей между переменной нагрузкой на отвале, скоростью машины, буксованием, тяговой мощностью, что позволит оценить адекватность математической модели тягового режима автогрейдера.

От СибАДИ

Д.т.н., профессор кафедры ТНКИ

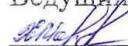
 Мещеряков В.А.

Преподаватель кафедры СМ

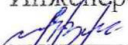
 Вебер В.В.

От ООО «ТК «БеконАвтоТранс»

Ведущий инженер по эксплуатации

 Хроленко Н.М.

Инженер-механик

 Таран В.В.

Механик автогрейдера

 Таран В.Э.

Приложение 2

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
деятельности ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
д.т.н., профессор

 Кузнецова В.Н.
« 24 » 05 2022 г.



АКТ


**внедрения результатов диссертационного исследования
в образовательный процесс**

В образовательный процесс кафедры «Техника для строительства и сервиса нефтегазовых комплексов и инфраструктур» ФГБОУ ВО «СибАДИ» внедрены следующие результаты диссертационного исследования на тему «Повышение эффективности управления рабочим органом автогрейдера в тяговом режиме», выполненного старшим преподавателем кафедры Вебером В.В.:

- методическое обеспечение настройки бортового измерительного комплекса, включая процедуру тарировки датчика усилия рабочего органа автогрейдера с использованием регрессионной модели;
- методика цифровой обработки информации об экспериментально полученных показателях тягового режима автогрейдера в MATLAB/SciLab.

Указанные результаты включены в курс дисциплины «Экспериментальные исследования рабочих процессов» для направления подготовки 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», программа магистратуры «Сервис транспортно-технологических машин и оборудования (нефтегазодобыча)» на основании решения кафедры (протокол №7 от 24 мая 2022 г.).

Заведующий кафедрой ТНКИ
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
к.т.н., профессор

 Демиденко А.И.
« 24 » 05 2022 г.

Соискатель ученой степени

 Вебер В.В.
« 24 » 05 2022 г.

Приложение 3

«Утверждаю»

Директор филиала №5

АО «ГК «Северавтодор»

Кравец И.Н.

2019 г.



АКТ

внедрения методики оценки влияния параметров тягового режима автогрейдера на техническую производительность и удельный расход топлива

Настоящий акт подтверждает передачу методики оценки влияния параметров тягового режима автогрейдера на техническую производительность и удельный расход топлива, разработанной в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», автор В.В. Вебер, для использования в «АО Государственная компания «Северавтодор», филиал № 5.

Методика принята к внедрению в отделе главного механика (ОГМ) филиала № 5 АО «ГК «Северавтодор» и будет использована для оценки производительности и топливной экономичности автогрейдера ДЗ-98 в зависимости от условий работы машины.

Главный инженер филиала № 5
АО «ГК «Северавтодор»

М.В. Абрамов