

*На правах рукописи*



**Вебер Виталий Викторович**

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

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Омск 2022

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

Научный руководитель: **Мещеряков Виталий Александрович**,  
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», профессор кафедры «Техника для строительства и сервиса нефтегазовых комплексов и инфраструктур» (г. Омск).

Официальные оппоненты: **Жулай Владимир Алексеевич**,  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», заведующий кафедрой строительной техники и инженерной механики имени проф. Н.А. Ульянова

**Чернявский Дмитрий Иванович**,  
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет, профессор кафедры «Машиноведение».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Защита диссертации состоится «14» сентября 2022 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета ВАК РФ Д 212.250.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» по адресу: 644080, г. Омск, проспект Мира, 5, аудитория 2.351.

Тел. (3812) 65-03-23, e-mail: [dissovetsibadi@bk.ru](mailto:dissovetsibadi@bk.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СибАДИ» и на сайте университета по адресу: <https://sibadi.org/about/units/institut-magistratury-iaspirantury/studies/dissertations/66096/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, пр. Мира, 5. Тел. (3812) 65-03-23, e-mail: [dissovetsibadi@bk.ru](mailto:dissovetsibadi@bk.ru).

Автореферат разослан « 22 » июня 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.250.02,  
доктор технических наук, профессор



Кузнецова Виктория Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **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 процессов.

Формализация выбора поддерживаемых значений параметров тягового режима тяжелых автогрейдеров остается сложной проблемой. Применяются различные критерии эффективности, оптимальные значения которых достигаются при различных 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.

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 этим, тема исследований, направленных на повышение эффективности управления рабочим органом тяжелого автогрейдера в тяговом режиме, является актуальной.

### **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 тяговым 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**

Методологическая база работы – системный анализ причинно-следственных связей между показателями тягового режима, параметрами ав-

тогрейдера, внешних воздействий и системы управления. Исследования содержат теоретические и экспериментальный 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 копания 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.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы 143 страницы, включая 78 рисунков, 6 таблиц и 3 приложения. Список литературы содержит 132 источника.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлено обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования. Дана краткая характеристика диссертационной работы.

**В первой главе** диссертации выполнен анализ работ по моделированию динамики рабочих процессов и по управлению рабочими процессами ЗТМ. Проанализированы тенденции развития систем автоматического управления рабочим органом (РО) автогрейдера.

Сделан вывод о необходимости теоретического обоснования значений поддерживаемой силы сопротивления на рабочем органе с использованием информации о предыдущих рабочих проходах автогрейдера. За основной критерий эффективности управления рабочим органом принята техническая производительность автогрейдера, для оценки топливной экономичности использован удельный расход топлива на единицу объема вырезанного грунта. Под силой сопротивления копания на рабочем органе понимается горизонтальная составляющая силы сопротивления, направленная против курса движения машины.

При исследованиях использованы значения конструктивных параметров автогрейдера с механической трансмиссией ДЗ-98В1. В работе теоретически исследована система управления отвалом, в которой электрический сигнал управления электрогидрораспределителями подъема-опускания отвала формируется либо оператором с помощью кнопок панели управления системы, либо автоматическим регулятором.

Сформулирована идея работы: обобщение результатов имитационного моделирования позволит найти новые зависимости между показателями тягового режима автогрейдера, критериями эффективности, конструктивными параметрами машины, параметрами внешних воздействий и системы управления отвалом. В связи с этим необходимо создание математической модели тягового режима.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели тягового режима автогрейдера. Приведены допущения, принятые в модели.

Предложена структура модели управления тяговым режимом автогрейдера (рисунок 1). Управляемой величиной, зависящей от времени  $t$ , является сила сопротивления копания на рабочем органе  $P(t)$ .

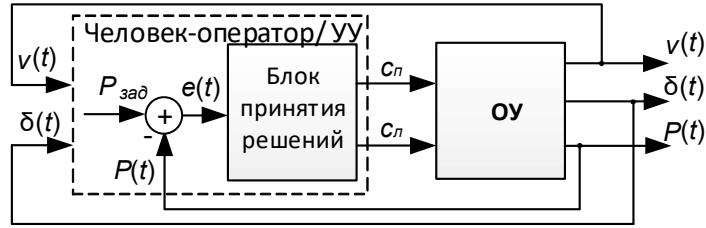


Рисунок 1 – Модель управления тяговым режимом автогрейдера

Управление высотным положением правой и левой сторон отвала осуществляется при помощи электрогидрораспределителей. Электрические сигналы включения правого и левого гидроцилиндров –  $c_n$  и  $c_l$ . При управлении высотным положением отвала автогрейдера в тяговом режиме  $c(t)=c_n(t)=c_l(t)$ . Они влияют на следующие показатели: среднюю глубину резания  $h$ , объем призмы волочения  $V_{np}$  и значение силы  $P$ .

Необходимо формировать управляющие сигналы  $c_n$  и  $c_l$  таким образом, чтобы ошибка управления  $e$  между заданным  $P_{зад}$  и текущим  $P(t)$  значениями силы была минимальной (закон управления по отклонению).

В процессе ручного управления тяговым режимом автогрейдера функции управляющего устройства (УУ) выполняет человек-оператор. За динамический объект управления (ОУ) принят рабочий процесс автогрейдера.

Модель учитывает режим работы двигателя: развиваемый двигателем крутящий момент  $M_e$ , угловую скорость выходного вала двигателя  $\omega_e$ . На производительность влияют теоретическая скорость (без учета буксования) машины  $v_m$ , действительная скорость машины  $v$ , коэффициент буксования  $\delta$ .

Использованы следующие выражения для оценки критериев – производительности и топливной экономичности автогрейдера. Техническая производительность:

$$\Pi_m = \frac{3600 \cdot S_2 \cdot v}{1000}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (1)$$

где  $S_2$  - площадь сечения вырезаемой стружки грунта,  $\text{м}^2$ .

$$S_2 = B \cdot \cos(\alpha) \cdot h, \quad (2)$$

где  $B$  - длина отвала, м;  $\alpha$  - угол захвата, град.

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, которой соответствуют значения мощности двигателя  $N_e$  и удельного расхода топлива  $g_e$ .

Часовой расход топлива

$$G_e = N_e \cdot g_e / 1000, \text{ кг/ч}, \quad (3)$$

где  $N_e$  - мощность двигателя, кВт;  $g_e$  - удельный расход топлива, г/кВт·ч.

Удельный расход топлива на  $1 \text{ м}^3$  вырезанного отвалом автогрейдера грунта:

$$g_{\Pi} = \frac{G_e}{\Pi_m}, \text{ кг/м}^3. \quad (4)$$

Разработана модель тягового режима автогрейдера, включающая подсистемы, представленные блоками на рисунке 2. Моделируемые показатели



тягового режима соответствуют сигналам – связям между блоками схемы. Варьируемые параметры автогрейдера (например, скорости штоков гидроцилиндров  $v_n$  и  $v_l$ ) и возмущений соответствуют параметрам блоков модели.

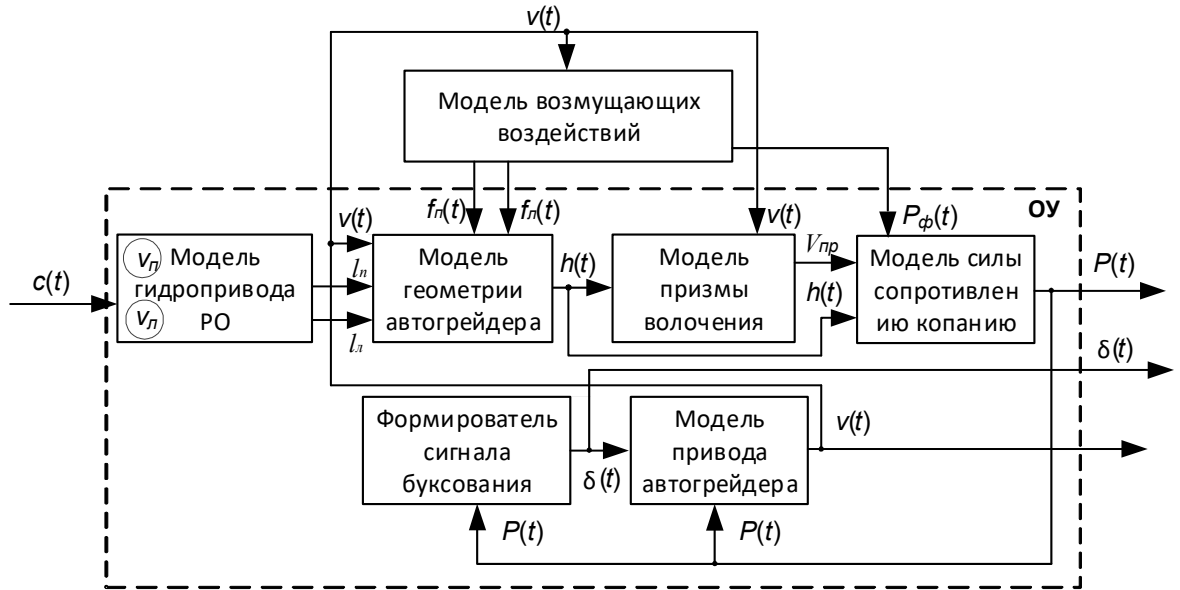


Рисунок 2 – Структурная схема модели тягового режима

Модернизирована модель возмущающих воздействий, на выходе которой формируются случайные сигналы с заданными статистическими и корреляционными характеристиками: высотные координаты микрорельефа поверхности земляного полотна по двум колеям  $f_n$  и  $f_l$ , а также нормированные флюктуации  $P_\phi$  силы сопротивления на РО, обусловленные неоднородностью грунта при копании.

Модернизирована модель гидропривода РО, на выходе которой формируются значения длин  $l_n$  и  $l_l$  штоков гидроцилиндров подъема-опускания отвала. Модернизованы модели геометрии автогрейдера (позиционирования РО), формирования призмы волочения, формирования силы сопротивления на РО. Использована полиномиальная модель зависимости коэффициента буксования от силы тяги. Для этих моделей рассчитаны параметры, соответствующие тяжелому автогрейдеру ДЗ-98.

Разработана модель динамики привода автогрейдера, описывающая зависимость угловой скорости вала двигателя  $\omega_e$  от момента сопротивления на движителях  $M_k$ . Модель основана на расчетной схеме (рисунок 3) и учитывает моменты инерции двигателя  $I_e$ , трансмиссии и движителей  $I_{mp}$ , поступательно движущихся масс  $I_3$ . На схеме:  $M_\delta$  – момент сцепления движителей с грунтом;  $\omega_m$  – угловая скорость колес, характеризующая действительную скорость;  $i_m$  – передаточное число трансмиссии;  $\eta_m$  – КПД механической трансмиссии.

Регуляторная характеристика двигателя задается в модели нелинейной табличной зависимостью  $M_e(\omega_e)$ . Аналогично задается зависимость коэффи-

циента буксования от момента на двигателе  $\delta(M_\delta)$ . Промежуточные значения  $M_e(\omega_e)$  и  $\delta(M_\delta)$  рассчитываются табличной интерполяцией.

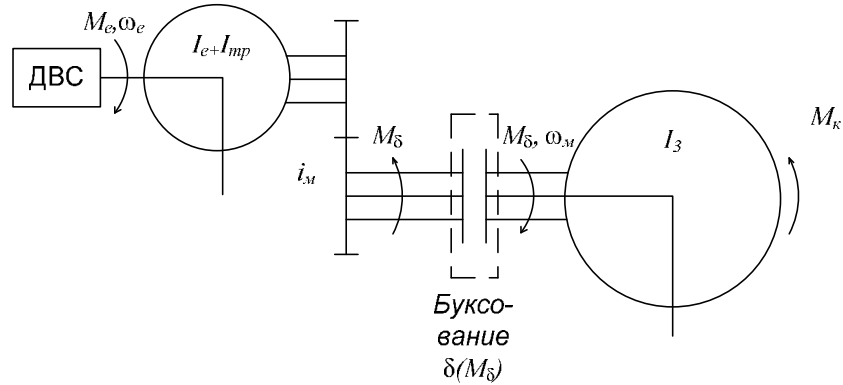


Рисунок 3 – Двухмассовая динамическая схема привода автогрейдера

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

$$\begin{cases} M_e - \frac{M_\delta}{i_{mp}\eta_m} - (I_e + I_{mp}) \frac{d\omega_e}{dt} = 0 \\ \frac{d\omega_e}{dt} - \frac{(\omega_e(t) - \omega_e(t - \Delta t))}{\Delta t} = 0 \\ \frac{M_\delta - M_k}{I_3} - \frac{1}{i_m} \cdot \frac{\omega_e(t) \cdot (1 - \delta(t)) - \omega_e(t - \Delta t) \cdot (1 - \delta(t - \Delta t))}{\Delta t} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

В работе предложен алгоритм численного решения системы (5) на каждом шаге времени  $t$ . Интегрированием углового ускорения вала двигателя на каждом шаге времени рассчитывается угловая скорость:

$$\omega_e = \frac{d\omega_e}{dt} \Delta t. \quad (6)$$

Программная реализация модели выполнена в MATLAB.

Оценка топливной экономичности автогрейдера по формулам (3) и (4) выполнена на основе многопараметровой характеристики двигателя ЯМЗ-238Н (рисунок 4). Для использования многопараметровой характеристики в имитационной модели построены двухфакторные нелинейные модели регрессии. Массивы дискретных значений мощности двигателя  $N_e$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , зависящих от среднего эффективного давления  $p_e$  и частоты вращения вала двигателя  $n_e$ , получены автором путем оцифровки исходных графических характеристик.

Методами подгонки кривых в MATLAB построены модели регрессии

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

$$\widehat{N_e} = 9,08 - 0,009146 \cdot n_e + 229,4 \cdot p_e + 0,02916 \cdot n_e \cdot p_e - 7,241 \cdot p_e^2. \quad (8)$$

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

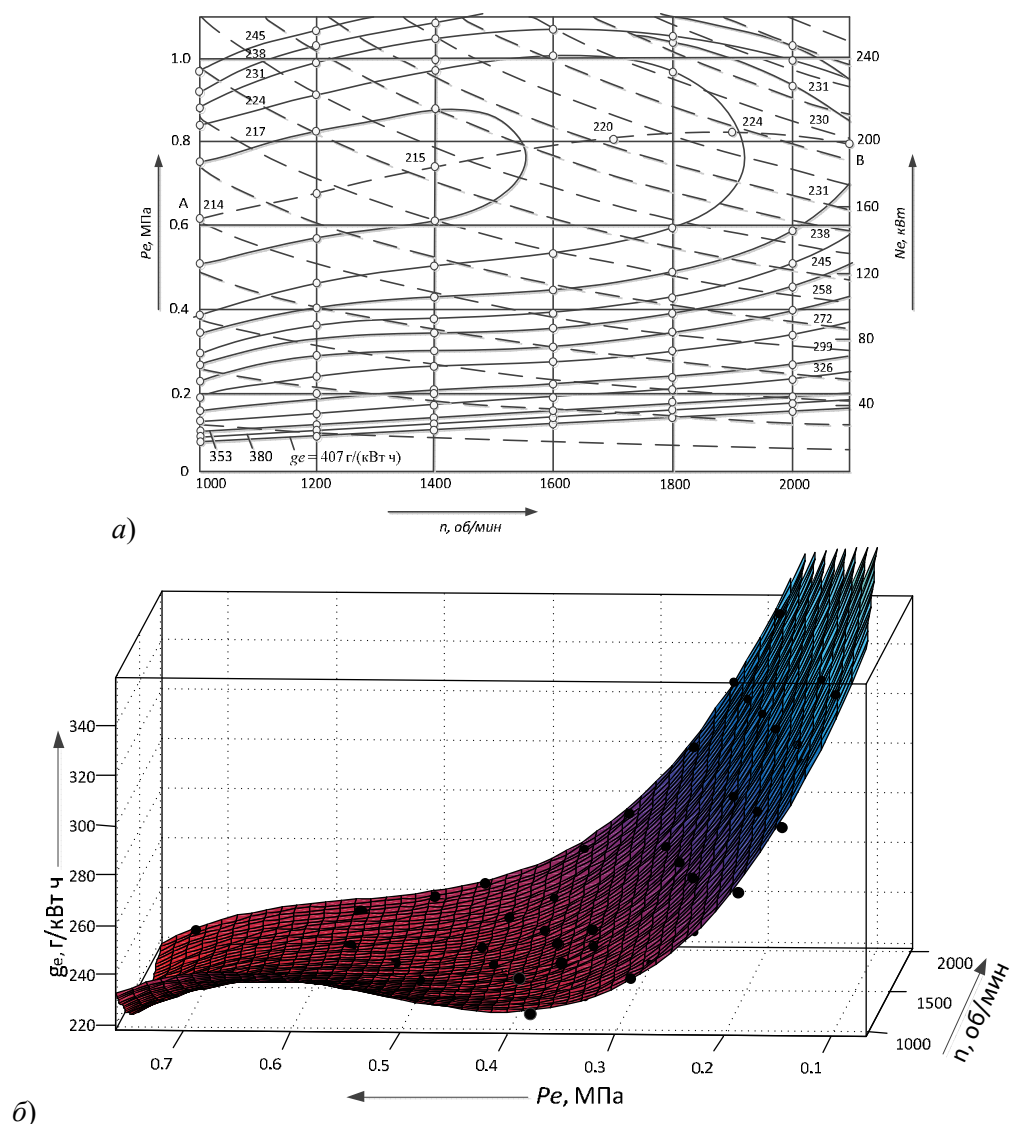


Рисунок 4 – Аппроксимация многопараметровой характеристики:  
 а) исходная графическая характеристика;  
 б) регрессионная модель удельного расхода топлива

Известна связь эффективного давления  $p_e$  и крутящего момента  $M_e$ :

$$p_e = 0,3147 \cdot 10^4 \cdot \frac{M_e \cdot \tau}{i \cdot V_h}, \text{ Па}, \quad (9)$$

где  $\tau$  – тактность двигателя;  $V_h$  – объем цилиндра, л;  $i$  – число цилиндров.

Частота связана с угловой скоростью вала двигателя:

$$n_e = \frac{\omega_e \cdot 60}{2\pi}, \text{ об/мин.} \quad (10)$$

Объединение программных реализаций подсистем (рисунок 2) в общую имитационную модель тягового режима показано на рисунке 5. Модельное время изменяется с шагом 0,01 с. Вместо человека-оператора, чей алгоритм управления отвалом сложно однозначно формализовать, в имитационную модель включена модель автоматического регулятора релейного типа, управляющего гидроприводом РО.

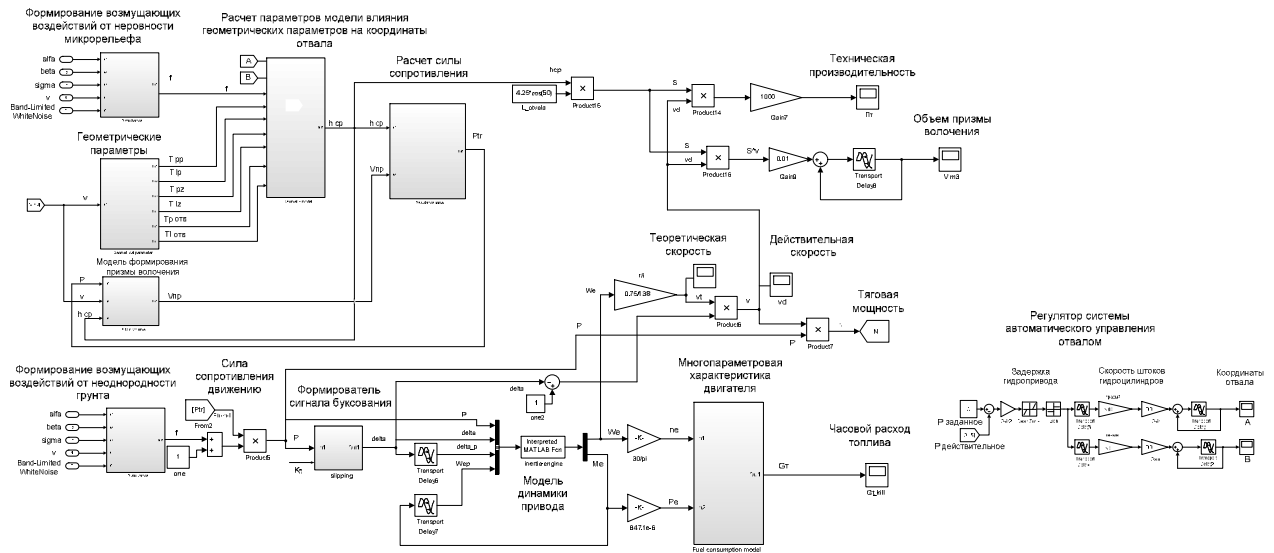


Рисунок 5 – Реализация имитационной модели тягового режима в MATLAB/Simulink

Имитационная модель предназначена для проведения вычислительных экспериментов. Варьируя заданное значение силы сопротивления, параметры возмущений, буксования, параметры регулятора и гидропривода, можно оценить влияние параметров на показатели тягового режима и критерии эффективности.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований автогрейдера ДЗ-98В1 с целью сбора данных о показателях тягового режима и подтверждения точности математической модели привода автогрейдера. Выполнена регистрация следующих показателей (рисунок 6): сила сопротивления копанью  $P(t)$ ; теоретическая скорость машины  $v_m(t)$ ; действительная скорость машины  $v(t)$ . Также рассчитаны коэффициент буксования  $\delta$  и тяговая мощность  $N$ . Решены следующие задачи экспериментальных исследований.

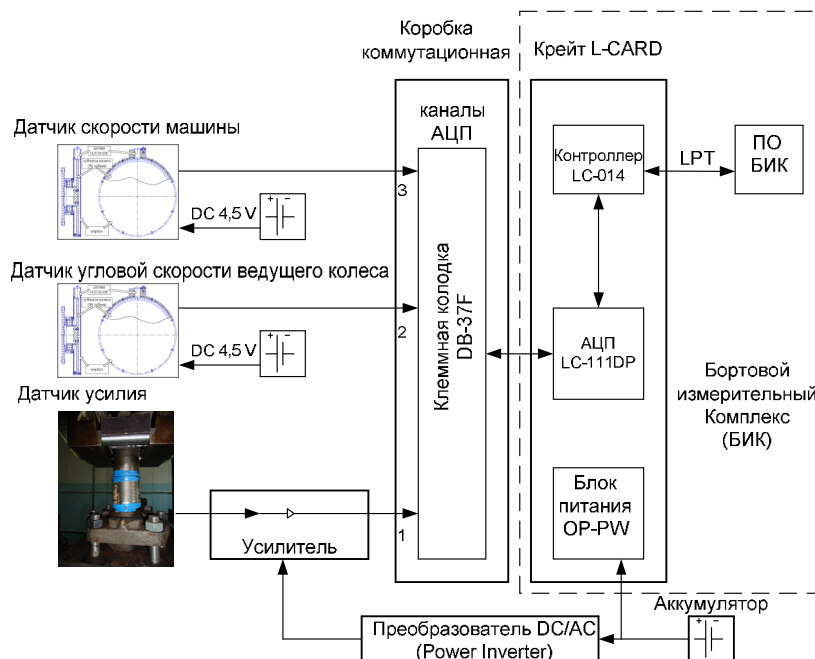


Рисунок 6 – Схема автоматизированного сбора экспериментальных данных

Автогрейдер оснащен регистрирующей аппаратурой на основе бортового измерительного комплекса (БИК). На шкворень тяговой рамы установлены тензодатчики для измерения силы сопротивления; на заднем ведущем колесе установлен датчик частоты вращения; сзади машины установлен датчик действительной скорости «пятое колесо» (рисунок 7).



Рисунок 7 – Установка датчиков и БИК

Специально изготовленный тензорезистивный датчик силы сопротивления предварительно испытан и тарирован (градуирован) с помощью разрывной машины ГРМ-1. При тарировке на каждом шаге нагружения датчика известному значению нагрузки  $P_T$  ставится в соответствие значение электрического напряжения  $U_T$  с тензодатчика. Получено уравнение регрессии для пересчета напряжения в значение силы:

$$P_T = 6,2 \cdot 10^4 + 2,7 \cdot 10^4 \cdot U_T. \quad (11)$$

Для проведения испытаний выбран горизонтальный прямолинейный участок грунтовой дороги длиной 200 м. Выполнен рабочий проход – зарезание и перемещение грунта основным отвалом. Грунт II категории (супесь), угол резания  $\beta = 40^\circ$ , угол захвата  $\alpha = 50^\circ$ . Работа велась на первой передаче трансмиссии с включенным передним мостом.

Выполнена цифровая обработка и статистический анализ измеренных сигналов. Последовательности импульсов напряжения с датчиков угловой скорости программно преобразованы в значения скоростей машины. Все сигналы приведены к одной частоте дискретизации 300 Гц, устранены случайные высокочастотные колебания и ложные частоты. Методика цифровой обработки информации об экспериментально полученных показателях тягового режима внедрена в учебный процесс ФГБОУ ВО «СибАДИ».

Полученные экспериментальные значения показателей тягового режима использованы для получения экспериментальных зависимостей между переменной силой сопротивления на РО (рисунок 8), теоретической  $v_m$  и действительной  $v$  скоростями машины (рисунок 9), коэффициентом буксования (рисунок 10), тяговой мощностью.

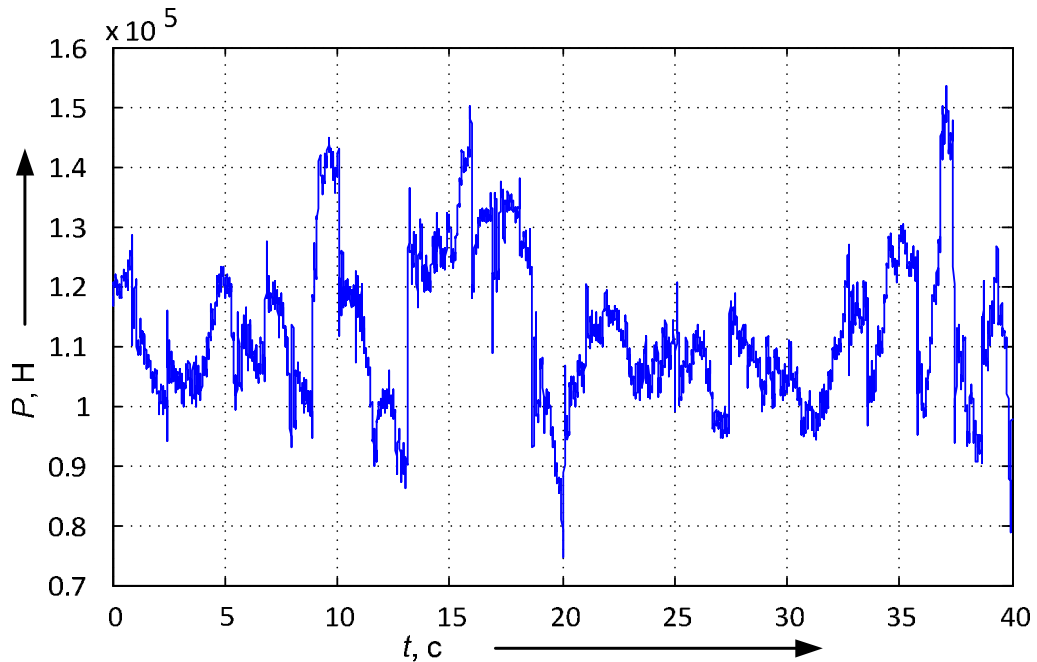


Рисунок 8 – Сила сопротивления на РО в установившемся режиме

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 математических ожиданий  $M\{\}$  и среднеквадратических отклонений  $\sigma\{\}$  показателей приведено в таблице 1.

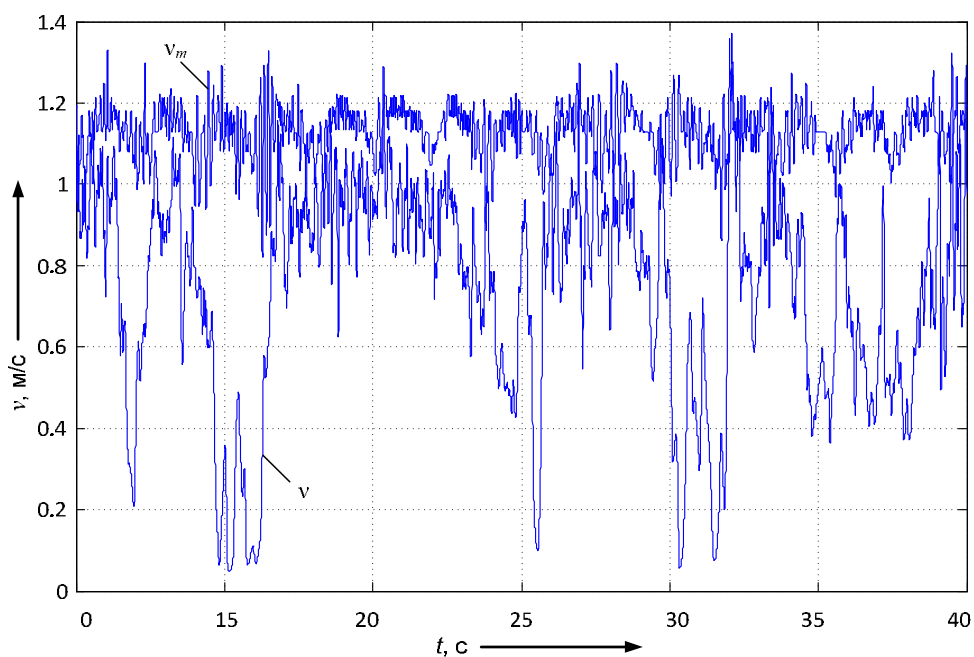


Рисунок 9 – Действительная и теоретическая скорости автогрейдера

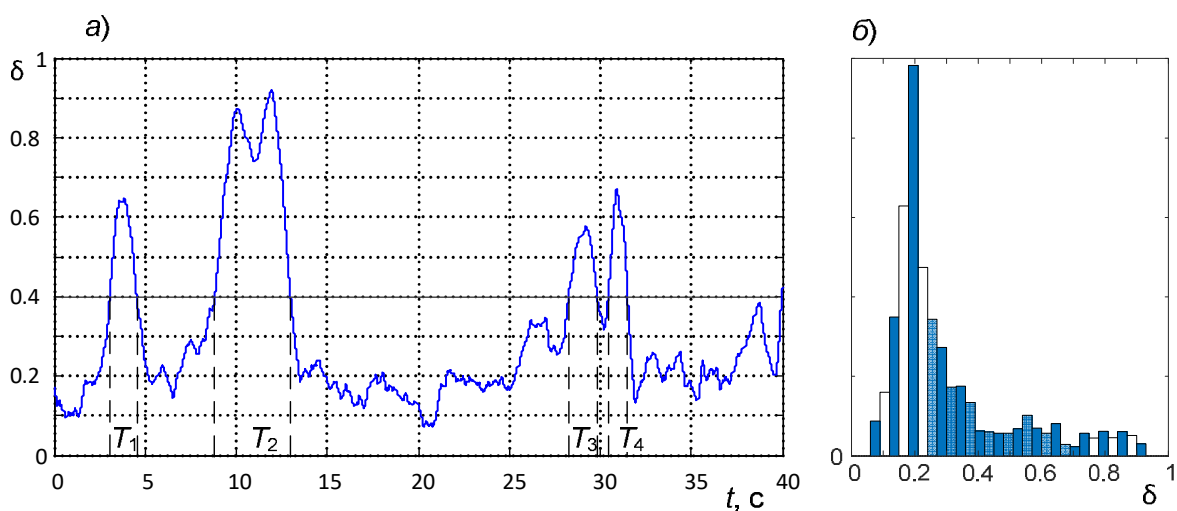


Рисунок 10 – Анализ коэффициента буксования:

а) выделение участков повышенного буксования; б) гистограмма частот

Таблица 1 – Статистические характеристики показателей тягового режима

	Модель		Эксперимент		Ошибка, %	
	$M\{\}$	$\sigma\{\}$	$M\{\}$	$\sigma\{\}$	$M\{\}$	$\sigma\{\}$
$P, \text{ Н}$	Как в эксперименте		112,5	12,4		
$\delta$			0,3027	0,1974		
$v_m, \text{ м/с}$	1,182	0,036	1,13	0,04	4,4	11,1
$v, \text{ м/с}$	0,822	0,229	0,7886	0,2596	4,1	13,4
$N_m, \text{ кВт}$	92,69	28,30	85,79	25,88	7,4	8,6

Расхождение значений статистических характеристик выходных показателей тягового режима для теории и эксперимента не превышает 15%. Сле-

лан вывод о приемлемой точности модели и возможности использования имитационной модели тягового режима автогрейдера.

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 10 выделены участки, на которых резкое возрастание  $\delta(t)$  не вызвано возрастанием  $P(t)$  и не соответствует функциональной зависимости  $\delta(P)$ . Анализ гистограммы частот показывает, что большинство наблюдений  $\delta$  попадает в диапазон  $0,075 < \delta < 0,4$ , и наибольшее значение частот находится вблизи  $\delta = 0,2$ , что согласуется с положениями теории колесных ЗТМ. Поэтому значения  $\delta > 0,4$  для исследуемого режима соответствуют повышенному буксованию. В интервалах времени  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  и  $T_4$  наблюдается повышение буксования  $\delta$  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»:

$$K_{\delta} = (\sum_i T_i) / T_s; \quad 0 \leq K_{\delta} \leq 1. \quad (12)$$

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

**В четвертой главе** приведены результаты исследования процесса управления тяговым режимом автогрейдера. В ходе вычислительного эксперимента оценивалось влияние изменяемых параметров (обведены кружками на рисунке 11) на величину критерия эффективности, на математическое ожидание  $M\{P\}$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma\{P\}$  силы сопротивления копанию.

Перед каждым запуском модели варьировались ширина зоны нечувствительности  $\Delta$  релейного регулятора, а также заданное значение силы сопротивления  $P_z$  (задающее воздействие). Варьировались также коэффициенты вариации  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , влияющие на среднеквадратические отклонения генерируемых случайных сигналов – высотных координат профиля грунтовой поверхности и флюктуации  $P_{\phi}(t)$  силы сопротивления. В генерируемый сигнал  $\delta(t)$  добавлялись участки повышенного буксования в соответствии с варьируемым значением параметра  $K_{\delta}$ .

Статистические характеристики показателей тягового режима для двух примеров реализации вычислительного эксперимента приведены в таблице 2.



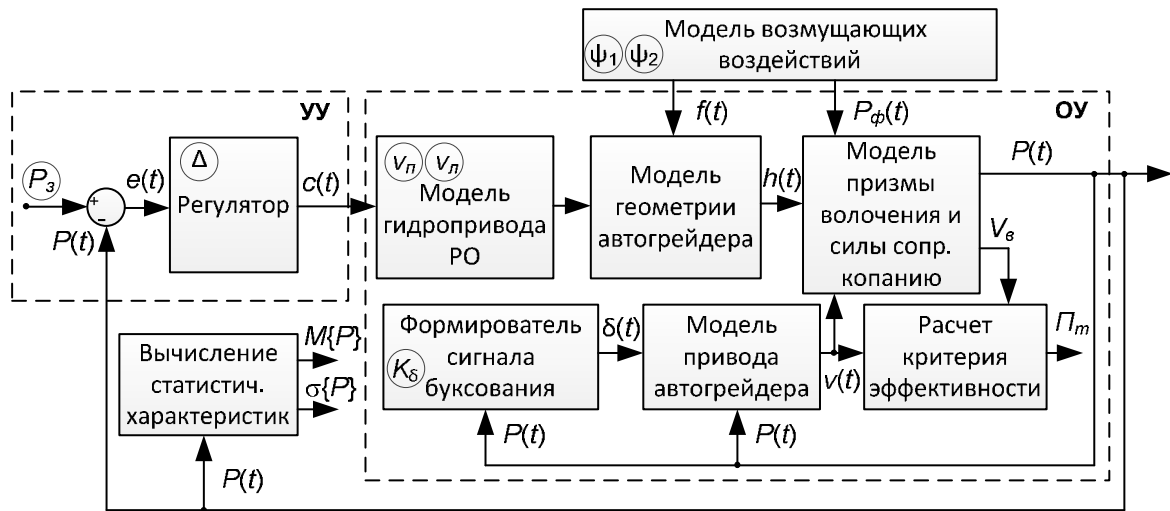


Рисунок 11 – Схема имитационной модели процесса управления тяговым режимом

Таблица 2. Статистические характеристики показателей тягового режима

	$y_n, \text{ м}$	$y_l, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$P, \text{ кН}$	$M_e, \text{ Нм}$	$v, \text{ м/с}$	$\delta$	$N, \text{ кВт}$
$M\{P\} = 120 \text{ кН}, K_\delta = 0,2$								
$M\{\cdot\}$	-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

Множеству значений варьируемых параметров процесса управления  $\Delta$ ,  $P_3$ ,  $v_n$ ,  $v_l$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  и  $K_\delta$  ставится в соответствие множество значений  $M\{P\}$ ,  $\sigma\{P\}$  и  $\Pi_m$ . Исследована зависимость критерия оптимальности управления  $\Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\}, K_\delta)$ .

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

$$P_{opt} = \arg \max_{M\{P\}} \Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\}, K_\delta). \quad (13)$$

Для исследования целевой функции при произвольных значениях  $M\{P\}$ ,  $\sigma\{P\}$  и  $K_\delta$  выполнены полиномиальные интерполяции  $\Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\})$ . В частности, при фиксированном значении  $K_\delta=0$  использован аппроксимирующий полином:

$$\begin{aligned} \Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\}) = & 3299 - 0,0986 \cdot M\{P\} + 0,06767 \cdot \sigma\{P\} + 1,117 \cdot 10^{-6} \cdot M^2\{P\} - \\ & - 5,146 \cdot 10^{-7} \cdot M\{P\} \cdot \sigma\{P\} - 3,318 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma^2\{P\} - 3,786 \cdot 10^{-12} \cdot M^3\{P\} - \\ & - 1,958 \cdot 10^{-12} \cdot M^2\{P\} \cdot \sigma\{P\} + 3,274 \cdot 10^{-11} \cdot M\{P\} \cdot \sigma^2\{P\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Процедура выбора оптимальных значений задающего воздействия показана на рисунке 12. При фиксированных значениях  $K_\delta$  и  $\sigma\{P\}$  по формуле (13) строятся графики зависимости  $\Pi_m(M\{P\})$ , и каждому графику ставится в соответствие оптимальное значение  $M\{P\}$  по критерию максимальной производительности. Таким образом формируется массив оптимальных значений  $P_{opt}$ , зависящих от  $\sigma\{P\}$  и  $K_\delta$ .

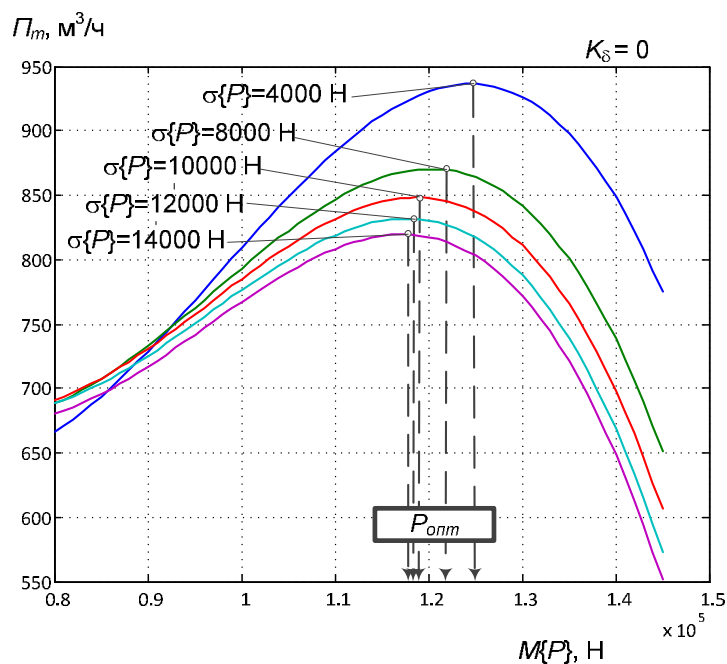


Рисунок 12 Выбор оптимального задающего воздействия

По аналогии получены зависимости альтернативного критерия  $g_n$  от характеристик силы сопротивления и буксования:

$$P_{онм} = \arg \min_{M\{P\}} g_n(M\{P\}, \sigma\{P\}, K_\delta). \quad (15)$$

Установлено, что критерий технической производительности более чувствителен к изменениям  $M\{P\}$ . Поэтому техническая производительность выбрана основным критерием настройки системы управления.

Результат формирования массива оптимальных значений задающего воздействия  $P_з = P_{онм}$  показан на рисунке 13. Эта зависимость используется как справочная таблица. По конкретным значениям характеристик  $\sigma\{P\}$  и  $K_\delta$ , полученным в результате измерения и обработки показателей предыдущего рабочего прохода автогрейдера, при помощи линейной двумерной табличной интерполяции вычисляется значение  $P_{онм}$ . Это значение силы сопротивления копания, которое должно поддерживаться системой управления отвалом во время следующего рабочего прохода для максимизации технической производительности автогрейдера.

По результатам имитационного моделирования системы с оптимальными значениями  $P_з = P_{онм}$  построены зависимости (рисунок 14) критериев эффективности процесса управления тяговым режимом от доли времени повышенного буксования  $K_\delta$  и среднеквадратического отклонения силы сопротивления копанию  $\sigma\{P\}$ .

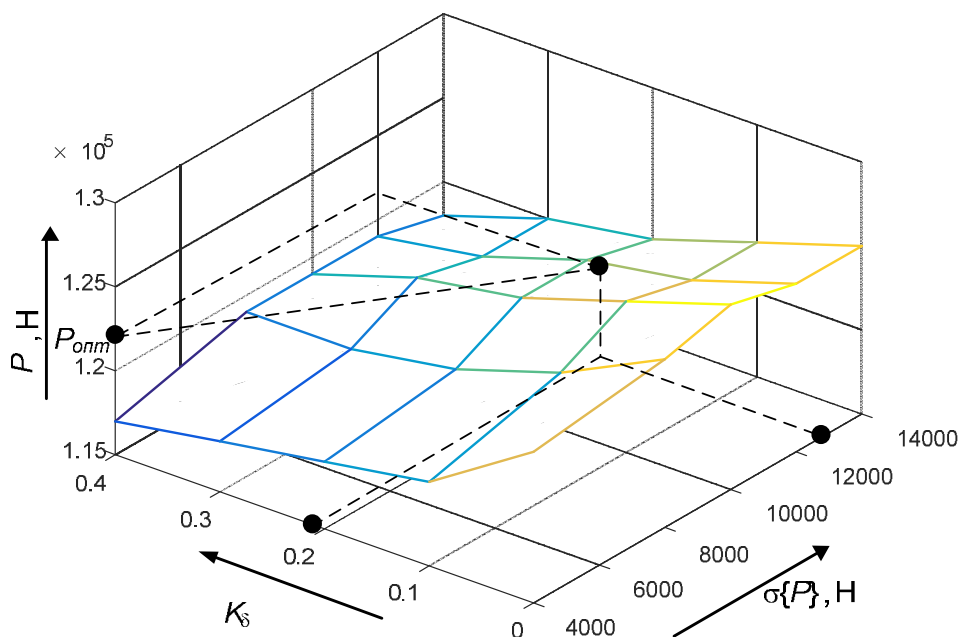


Рисунок 13 – Зависимость оптимального задающего воздействия от среднеквадратического отклонения силы сопротивления копания и доли времени повышенного буксования

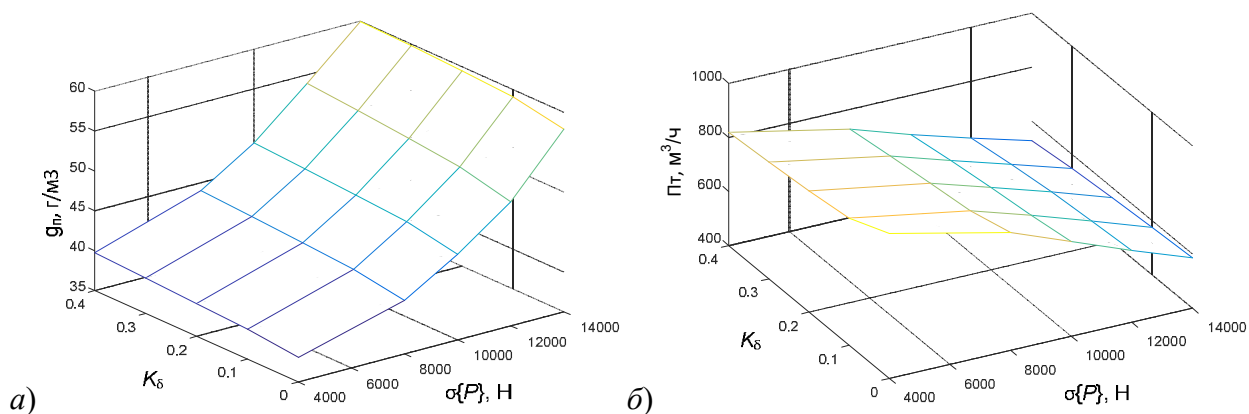


Рисунок 14 – Зависимости критериев эффективности от характеристик показателей тягового режима при рекомендуемой поддерживаемой силе сопротивления:  
а) удельный расход топлива; б) максимальная техническая производительность.

Предложена структура системы управления, обеспечивающая формирование задающего воздействия в соответствии с рисунком 13. Управляющее устройство содержит формирователь задающего воздействия (ФЗВ). Входными сигналами УУ являются измеренные значения силы сопротивления на РО и коэффициент буксования (рисунок 15).

Разработаны алгоритмы функционирования УУ, рекомендации по проектированию системы управления рабочим органом автогрейдера. Проект блока управления, выполняющего функции УУ и обеспечивающего взаимодействие с человеком-оператором, предназначен для режимов автоматического управления отвалом и ручного управления с использованием ассистента (индикации рекомендаций по подъему/заглублению отвала).

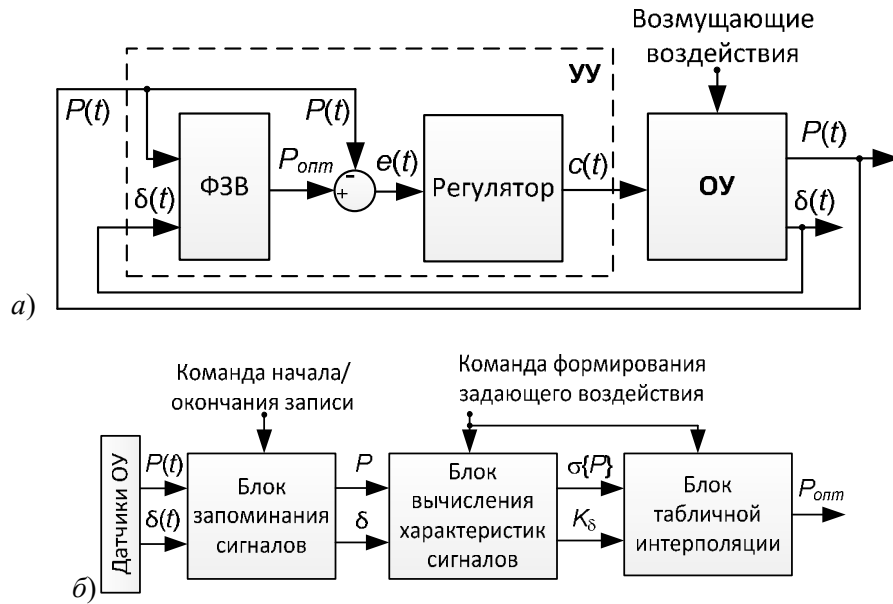


Рисунок 15 – Модель системы управления отвалом автогрейдера:  
 а) функциональная схема системы управления; б) функциональная схема ФЗВ

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

На основе полученных зависимостей (рисунок 14) разработана методика оценки влияния параметров тягового режима на производительность и топливную экономичность автогрейдера. Методика, внедренная в АО «ГК «Северавтодор», позволяет уточнить оценку удельного 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 на дорожно-строительных предприятиях.

Исходной информацией для нормирования расхода топлива по данной методике служат: данные эксплуатационных документов на машины; показатели, характеризующие условия работы машин.

Часовая норма расхода топлива машины  $q_{ч}$ , кг/маш.-ч, определяется:

$$q_{ч} = q_e N K 10^{-3}, \quad (16)$$

где  $q_e$  — удельный расход топлива двигателя, г/кВтч;  $N$  — мощность двигателя машины, кВт;  $K$  — интегральный нормативный коэффициент изменения расхода топлива в зависимости от режимов загрузки двигателя машины.

$$K = 1,03 K_B K_M K_{TM} K_I, \quad (17)$$

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;  $K_M$  — коэффициент использования мощности двигателя;  $K_{TM}$  — коэффициент, учитывающий изменение расхода топлива в зависимости от  $K_M$ ;  $K_I$  — коэффициент, учитывающий износ двигателя.

Получены зависимости коэффициента  $K_{TM}$  от режимов эксплуатации машины и грунтовых условий, которые при помощи экспертных оценок све-

дены к доле времени повышенного буксования  $K_\delta$  и среднеквадратическому отклонению силы сопротивления копания  $\sigma\{P\}$ . Рекомендации по оценке топливной экономичности и коэффициента, учитывающего изменение расхода топлива, сведены в таблицу 3. Изменение оценок технической производительности в зависимости от условий эксплуатации автогрейдера приведено в таблице 4.

Таблица 3 – Значения удельного расхода топлива  $g_n$  в характерных точках

Условия сцепления движителей с грунтом	$K_\delta$	$\sigma\{P\}, \text{ Н}$					
		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	<b>45,33</b>	<b>1,14</b>	56,12	1,35
Плохое	0,35	41,7	0,94	45,94	1,15	56,76	1,37

Таблица 4 – Значения технической производительности  $\Pi_m$  в характерных точках

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

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные результаты и выводы

1. Разработана структура модели тягового режима автогрейдера. Управляемой величиной является сила сопротивления копания на рабочем органе  $P(t)$ . Критерием эффективности управления рабочим органом автогрейдера является техническая производительность  $\Pi_m$ . 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 микрорельефа 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 бук-

сования, 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 копания  $P$ , теоретическая скорость машины  $v_m$ , действительная скорость машины  $v$ , коэффициент буксования колесных движителей  $\delta$ , 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»  $K_\delta$ .

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  $K_\delta$ . 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

### **В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:**

1. Мещеряков, В.А., Вебер В.В. Динамическая модель привода землеройно-транспортной машины с механической трансмиссией // Механизация строительства. – 2007. – № 10. – С. 27–29.

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

3. Мещеряков, В.А., Вебер В.В. Оптимизация задающего воздействия для системы управления тяговым режимом автогрейдера / В.А. Мещеряков, В.В. Вебер // Вестник СибАДИ. – 2018. – Том 15, № 4. – С. 502 – 513.

### **Статьи в материалах конференций и других изданиях:**

4. 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.-Петербург. ун-та, 2007. – С. 711–716.

5. 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.

6. 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.

7. Мещеряков В.А., Вебер В.В. Оценка эффективности применения системы автоматического управления тяговым режимом автогрейдера // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов III Международной научно-практической конференции 29–30 ноября 2018 г. – Омск, СибАДИ 2019. – С. 77–81.

8. Вебер В.В. Методика оценки влияния параметров тягового режима автогрейдера на техническую производительность и удельный расход топлива // 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.

9. Мещеряков В.А., Вебер В.В. Проектирование блока управления и обоснование режимов функционирования системы управления рабочим органом автогрейдера // Техника и технологии строительства, № 1 (29), 2022. С. 12–18.

## **ВЕБЕР ВИТАЛИЙ ВИКТОРОВИЧ**

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

#### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано к печати 20.06.2022  
Формат 60x90 1/16. Бумага офсетная.  
Оперативный способ печати.  
Усл. п. л. 1,5  
Тираж 150 Заказ № 167

---

Отпечатано в типографии ООО «АН2»  
644080 г. Омск, ул. Поселковая, 26