

УДК 621.878, 519.711.2

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАДАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ РЕЖИМОМ АВТОГРЕЙДЕРА

В.А. Мещеряков, В.В. Вебер
ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработан метод оптимальной настройки системы автоматического управления рабочим органом тяжелого автогрейдера. Система предназначена для поддержания заданного значения силы сопротивления копания на рабочем органе. Оптимизация задающего воздействия осуществляется по критерию максимальной технической производительности автогрейдера в режиме копания грунта.

Материалы и методы. Оптимальное задающее воздействие формируется на основе информации о характеристиках сигналов – измеренных значений силы сопротивления копания и коэффициента буксования движителей во время предыдущего рабочего прохода автогрейдера. Исследование включает:

- разработку структуры системы управления отвалом автогрейдера, содержащей формирователь задающего воздействия;
- обоснование характеристики сигнала буксования, используемой в целях управления;
- разработку алгоритма формирования задающего воздействия микропроцессорным управляющим устройством;
- программную реализацию имитационной модели тягового режима автогрейдера и проведение вычислительного эксперимента;
- разработку алгоритма формирования массива оптимальных значений задающего воздействия на основе результатов вычислительного эксперимента;
- получение зависимости оптимального задающего воздействия от характеристик сигналов, поступающих в управляющее устройство.

Результаты. Сформирован массив оптимальных значений задающего воздействия в зависимости от характеристик силы сопротивления копания и коэффициента буксования движителей. Предложена структура системы управления, включающая микропроцессорное управляющее устройство, и алгоритм функционирования формирователя оптимального управляющего воздействия.

Обсуждение и заключение. Выполнено теоретическое обоснование оптимального задающего воздействия системы управления тяговым режимом автогрейдера и предложен метод настройки системы автоматического управления отвалом тяжелого автогрейдера в режиме копания грунта.

Отличительными особенностями предложенного метода являются:

- оптимальное управление по критерию технической производительности автогрейдера;
- учет динамики и стохастического характера процессов с помощью имитационной модели, использование среднеквадратического отклонения измеренной силы сопротивления копания для настройки системы;
- учет наличия участков грунтовой поверхности с повышенным буксованием колесных движителей и использование вычисленной доли времени повышенного буксования для настройки системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автогрейдер, система автоматического управления, оптимальное управление, задающее воздействие, имитационное моделирование.

© В.А. Мещеряков, В.В. Вебер



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

SETPOINT OPTIMIZATION FOR THE CONTROL SYSTEM OF THE MOTOR GRADER IN HEAVY-LOAD MODE

V.A. Meshcheryakov, V.V. Weber

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. The authors suggest the optimal tuning method for an automatic control system of the heavy motor grader blade. The demonstrated system regulates the value of digging force. Moreover, the setpoint optimization criterion is the maximum of production rate.

Materials and methods. The optimal setpoint is generating to the signal estimations, specifically to the measured digging force and the wheels slip ratio during the previous stroke of the motor grader.

There search includes:

- development of the blade control system functional diagram including the setpoint former;
- meaningful estimation of the slip ratio signal for control purposes;
- development of the setpoint forming algorithm for a microprocessor control unit;
- program realization of the motor grader workflow model and simulation;
- development of the algorithm to compose the lookup table containing optimal setpoint values and based on simulation results;
- dependence of optimal setpoint on the incoming signal estimations.

Results. The lookup table of optimal setpoint values is obtained, the estimations of digging force and wheels slip ratio are presented. In addition, the authors suggest the control system structure with the optimal setpoint former and also develop the former operation algorithm.

Discussion and conclusion. The optimal setpoint values are theoretically validated for the motor grader control system. The tuning method for an automatic control system of the heavy motor grader blade has the following characteristics as:

- the optimal control criterion as the production rate;
- process dynamics and stochastics;
- the excessive slippage time ratio.

KEYWORDS: motor grader, automatic control system, optimal control, setpoint, simulation.

© V.A. Meshcheryakov, V.V. Weber



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Землеройно-транспортные машины (ЗТМ) оснащаются системами автоматического управления с целью повышения производительности, качества выполняемых работ, улучшения топливной экономичности и снижения нагрузки на человека-оператора. Большинство систем управления тяговым режимом ЗТМ используют гидропривод рабочего оборудования для поддержания рационального нагрузочного режима силовой установки, увеличения объема вырезанного и перемещенного грунта во время рабочего прохода [1, 2, 3].

Оптимизации параметров тяговых режимов ЗТМ посвящены работы, в которых исследованы и обоснованы различные критерии оптимальности: максимальная тяговая мощность [4], производительность ЗТМ [5, 6], удельный расход топлива на единицу объема разработанного грунта [7, 8].

В системах регулирования, поддерживающих заданное значение силы сопротивления копания на рабочем органе ЗТМ, значение задающего воздействия устанавливается при настройке системы, исходя из анализа тяговой характеристики машины, и не изменяется для выбранного режима при эксплуатации системы. Теоретическое обоснование заданных параметров тяговых режимов осуществляется путем математического моделирования динамики рабочих процессов [9, 10, 11, 12], а также в результате анализа статических характеристик двигателя и ЗТМ в целом [13, 14].

Большинство регуляторов систем автоматического управления тяговым режимом реализуют закон управления по отклонению. Основное внимание при синтезе таких систем управления уделяется настройке параметров регуляторов и гидропривода рабочего органа. Управляющие устройства в реальном времени используют информацию об измеряемых сигналах: силе сопротивления копания и коэффициенте буксования, определяемом по значениям действительной и теоретической скорости [15].

Статистические и спектральные характеристики силы сопротивления копания на рабочем органе зависят от глубины резания грунта и объема призмы волочения в динамике, влияют на режим работы силовой установки, скорость машины и, в итоге, на производительность и топливную экономичность машины [4, 16]. Буксование движителей, зависящее от силы тяги и грунтовых условий, также является случайным процессом, характеристики которого необходимо учитывать при обоснова-

нии рекомендуемых параметров тягового режима [17, 18]. Заданное значение силы сопротивления копания следует выбирать с учетом перечисленных факторов.

Поскольку условия работы ЗТМ случайно меняются в широком диапазоне, проблема теоретически обоснованного автоматического выбора поддерживаемых значений параметров тягового режима ЗТМ остается открытой.

Целью настоящей работы является теоретическое обоснование оптимального задающего воздействия системы управления тяговым режимом с учетом стохастического характера показателей рабочего процесса и динамики машины.

В работе предложен метод формирования задающего воздействия для системы автоматического управления рабочим органом (РО) тяжелого автогрейдера. Система должна поддерживать заданное значение силы сопротивления копания (горизонтальной составляющей) на рабочем органе. Оптимизация задающего воздействия осуществляется по критерию максимальной технической производительности автогрейдера в режиме копания грунта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предложен метод оптимальной настройки системы автоматического управления тяговым режимом автогрейдера. Согласно этому методу, оптимальное задающее воздействие (поддерживаемое значение силы сопротивления копания) формируется на основе информации о характеристиках сигналов – измеренных значений силы сопротивления копания и коэффициента буксования движителей во время предыдущего рабочего прохода автогрейдера.

Общая структура исследования включает в себя решение следующих задач:

- разработка структуры системы управления отвалом автогрейдера, содержащей формирователь задающего воздействия;
- обоснование характеристики сигнала буксования, используемой в целях управления;
- разработка алгоритма формирования задающего воздействия микропроцессорным управляющим устройством;
- программная реализация имитационной модели тягового режима автогрейдера и проведение вычислительного эксперимента;
- разработка алгоритма формирования массива оптимальных значений задающего воздействия на основе результатов вычислительного эксперимента;

- получение зависимости оптимального задающего воздействия от характеристик сигналов, поступающих в управляющее устройство.

Разработанная структура системы управления (рисунок 1) содержит управляющее устройство (УУ) и объект управления (ОУ). Управляемой величиной, зависящей от времени t , является сила сопротивления копания на рабочем органе автогрейдера $P(t)$, измеренная в шарнире крепления тяговой рамы к основной раме машины.

ОУ представляет собой рабочий процесс автогрейдера, включающий подпроцессы взаимодействия отвала и движителей с грунтом, функционирования силовой установки, трансмиссии, гидропривода рабочего органа. Дополнительным выходным информационным сигналом ОУ является коэффициент буксования $\delta(t)$. Возмущающие воздействия на ОУ включают в себя влияние координат профиля необработанной грунтовой поверхности на координаты отвала и глубину копания, а также неоднородность разрабатываемого грунта, вызывающую случайные колебания $P(t)$.

Бортовое микропроцессорное УУ реализует закон управления по отклонению. При отклонении измеренного значения управляемой величины $P(t)$ от заданного значения $P_{\text{опт}}$ регулятор формирует на выходе сигнал $c(t)$ включения электрогидравлических распределителей гидроцилиндров подъема-опускания отвала. Исследования выполнены для регулятора релейного типа с зоной нечувствительности [19]. Оптимизация задающего воздействия $P_{\text{опт}}$ выполняется в формирователе задающего воздействия (ФЗВ) в составе УУ. Вычисление значений задающего воздействия $P_{\text{опт}}$ 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, входящих в состав ОУ.

Сигнал коэффициента буксования $\delta(t)$ при физической реализации системы может быть заменен парой сигналов действительной $v(t)$ и теоретической $v_r(t)$ скоростей автогрейдера [15]. Вычисление мгновенных значений коэффициента буксования [17] может быть выполнено программно в ФЗВ по формуле $\delta(t) = (v_m(t) - v(t))/v_m(t)$.

Буксование колесных движителей в динамике зависит от силы тяги, силы сопротивления $P(t)$, грунтовых условий, существенно влияет на действительную скорость машины $v(t)$ и на техническую производительность Π_m . Анализ экспериментальных значений коэффициента буксования $\delta(t)$ [20] показал, что для всей длительности рабочего прохода автогрейдера не всегда возможно построить адекватную функциональную зависимость $\delta(P)$ из-за изменяющихся свойств опорной грунтовой поверхности. 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. Мы предлагаем учитывать это явление с помощью показателя рабочего процесса «доля времени повышенного буксования».

На рисунке 2а приведен экспериментально измеренный сигнал – коэффициент буксования $\delta(t)$ движителей тяжелого автогрейдера с механической трансмиссией [20]. Длительность

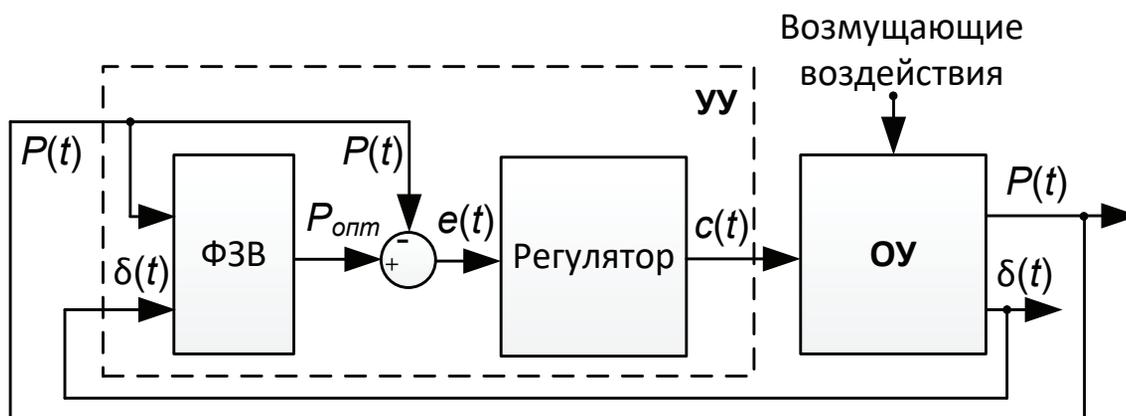


Рисунок 1 – Функциональная схема системы управления тяговым режимом автогрейдера

Figure 1 – Functional diagram of the motor grader's control system

Источник: составлено авторами

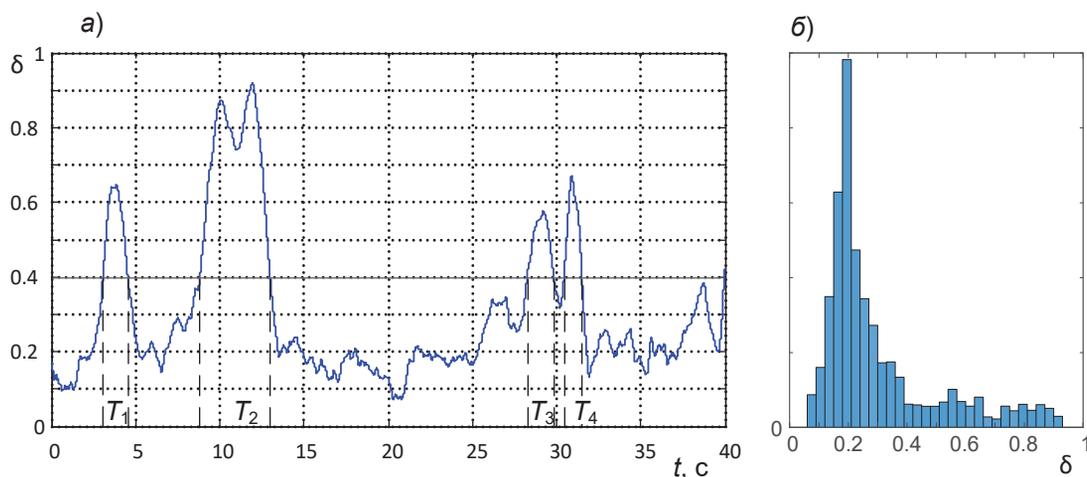


Рисунок 2 – Анализ коэффициента буксования

Figure 2 – Slip ratio analysis

Источник: составлено авторами

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 2а видны участки, на которых резкое возрастание $\delta(t)$ не вызвано возрастанием $P(t)$ и не соответствует функциональной зависимости $\delta(P)$.

Анализ гистограммы частот на рисунке 2б 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 [17]. Поэтому значения $\delta > 0,4$ для исследуемого режима соответствуют повышенному буксованию. На рисунке 2а в интервалах времени T_1, T_2, T_3 и T_4 наблюдается повыше-

ние буксования δ и падение действительной скорости машины v . Обозначим долю времени повышенного буксования

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

Эта характеристика сигнала коэффициента буксования используется в УУ для обоснования значения поддерживаемой силы сопротивления на отвале автогрейдера.

Формирователь задающего воздействия (ФЗВ) в составе микропроцессорного УУ содержит блок запоминания сигналов (рисунок 3). От оператора автогрейдера перед началом рабочего прохода поступает команда, инициирующая запоминание оцифрованных сигналов $P(t)$ и $\delta(t)$. Команда начала записи

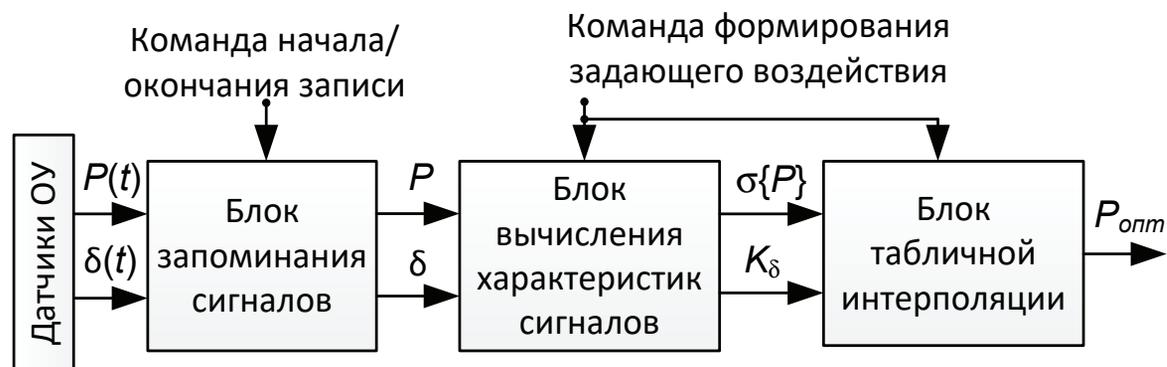


Рисунок 3 – Функциональная схема формирователя задающего воздействия

Figure 3 – Functional diagram of the setpoint former

Источник: составлено авторами

также может быть сформирована в УУ автоматически при превышении пороговых значений измеряемых сигналов $P(t)$ и $v(t)$ во время рабочего прохода. Окончание процесса записи сигналов производится либо по команде оператора, либо при выглублении отвала и остановке автогрейдера (при достижении пороговых значений P и v).

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 копанью.
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 (1).
7. Расчет оптимального значения задающего воздействия с помощью линейной двумерной табличной интерполяции зависимости $P_{\text{опт}}(\sigma\{P\}, K_\delta)$.

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

Зависимость $P_{\text{опт}}(\sigma\{P\}, K_\delta)$, используемая на шаге 7, получена на основе моделирования процесса управления тяговым режимом автогрейдера. Разработана имитационная модель, предназначенная для проведения вычислительных экспериментов. Модель используется для определения зависимостей между параметрами регулятора, машины, показателями рабочего процесса и критерием оптимальности – технической производительностью автогрейдера Π_m (объем грунта, сошедшего с отвала за единицу времени).

Имитационная модель процесса управления тяговым режимом автогрейдера, программно реализованная в MATLAB/Simulink [16], содержит модели ОУ, УУ, а также модель формирования возмущающих воздействий (рисунок 4). В ходе вычислительного эксперимента оценивалось влияние изменяемых параметров (обведены кружками на схеме) возмущений, УУ и ОУ на величину технической производительности автогрейдера Π_m (критерий оптимальности настройки УУ) и на статистические характеристики управляемой величины $P(t)$: математическое ожидание $M\{P\}$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma\{P\}$ силы сопротивления копанью.

Перед каждым прогоном модели варьировались значения параметров УУ: ширина зоны нечувствительности Δ релейного звена в со-

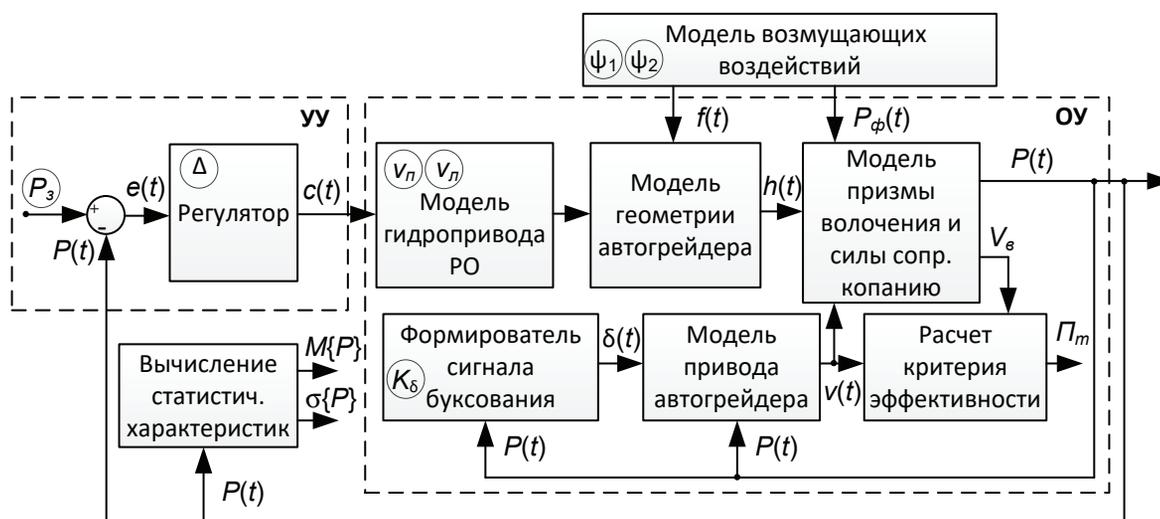


Рисунок 4 – Схема имитационной модели процесса управления

Figure 4 – Diagram of the control process' simulation model

Источник: составлено авторами

ставе регулятора (пороговое значение ошибки регулирования $e(t)$, при котором не формируется сигнал подъема/опускания отвала, т.е. $s(t)=0$ при $|e(t)| < \Delta$), а также заданное значение силы сопротивления копания 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 копания, обусловленные неоднородностью разрабатываемого грунта.

Изменяемыми параметрами ОУ являются скорости подъема/опускания правой и левой сторон отвала v_n и v_n' . Эти параметры влияют на глубину копания $h(t)$ и объем разработанного грунта V_g .

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 .

Модель содержит значительное количество допущений [16]. Точность моделей формирования $P(t)$ и $v(t)$, входящих в состав модели ОУ, оценена на основе результатов экспериментальных исследований [20]. 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 копания, которая, в свою очередь, влияет на производительность. При различных комбинациях параметров модели можно получить близкие значения $\sigma\{P\}$ и Π_m . Для практической реализации системы управления необходимо сократить количество измеряемых сигналов и снизить размерность про-

странства параметров процесса управления.

В результате имитационного моделирования множеству значений варьируемых параметров процесса управления Δ , $P_3, v_n, v_n', \psi_1, \psi_2$ и K_δ ставится в соответствие множество значений $M\{P\}, \sigma\{P\}$ и Π_m . Параметры УУ, гидропривода и возмущений Δ , $P_3, v_n, v_n', \psi_1, \psi_2$ 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 $\Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\}, K_\delta)$.

Оптимальные значения задающего воздействия системы управления являются решениями задачи оптимизации:

$$P_{opt} = \arg \max_{M\{P\}} \Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\}, K_\delta). \quad (2)$$

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 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 в диапазоне $0 \dots 0,4$ с шагом $0,1$. Математическое ожидание управляемой величины $M\{P\}$ практически совпадает с заданным значением P_3 , которое варьировалось в диапазоне $80000 \dots 145000$ 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:

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

Нормированный коэффициент детерминации $\bar{R}^2 = 0,94$ и визуальный анализ графиков показывают высокую точность аппроксимации. Далее вместо значений Π_m , полученных в результате вычислительного эксперимента, используются аппроксимированные значения.

Процедура выбора оптимальных значений задающего воздействия показана на рисунке 5. При фиксированных значениях K_δ и $\sigma\{P\}$ по формуле (3) строятся графики зависимости $\Pi_m(M\{P\})$, и каждому графику ставится в соответствие оптимальное значение $M\{P\}$ по критерию максимальной производительности (т.е. находится решение задачи (2)). 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 .

Формирование массива оптимальных значений задающего воздействия P_{opt} , используемого в блоке табличной интерполяции ФЗВ, выполнено в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Задать значения параметров имитационной модели, варьируемых в заранее определенных диапазонах и с определенным шагом: $\Delta, P_3, \psi_1, \psi_2, v_n, v_l$.

2. Задать значение доли времени повышенного буксования K_δ .

3. Выполнить прогон модели, сохранить результаты (значения моделируемых показателей процесса). Определить отсутствие автоколебаний в системе управления.

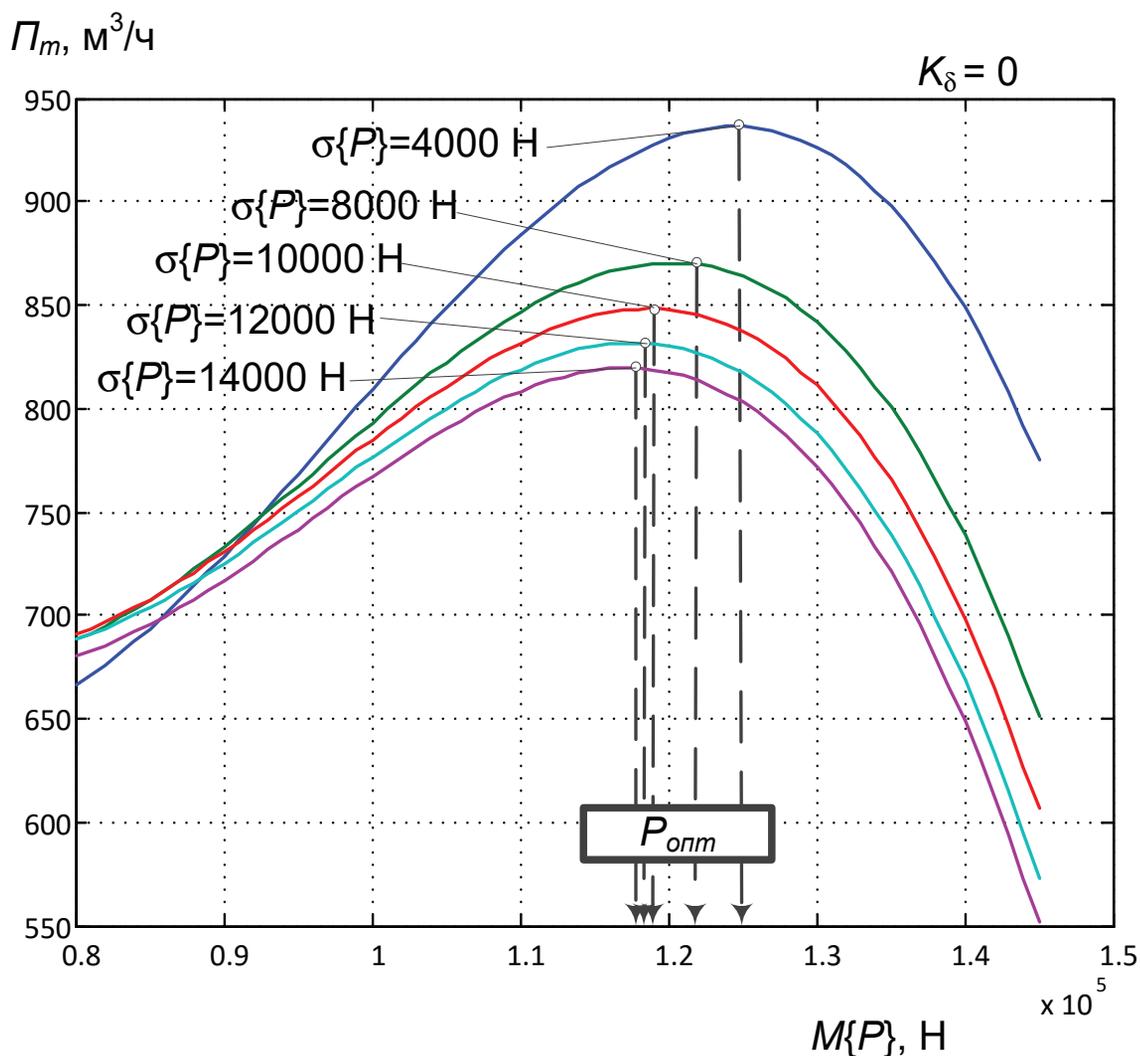


Рисунок 5 – Выбор оптимального задающего воздействия

Figure 5 – Selection of the optimal setpoint

Источник: составлено авторами

4. Вычислить и записать в массив полученные значения $M\{P\}$, $\sigma\{P\}$, Π_m . Шаги 1–4 повторяются до завершения вычислительного эксперимента.

5. Задать фиксированное значение K_δ .

6. Построить аппроксимирующий полином 2–3 порядка для зависимости $\Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\})$ по аналогии с выражением (3).

7. Задать фиксированное значение $\sigma\{P\}$.

8. Изменяя $M\{P\}$, построить график аппроксимирующей зависимости $\Pi_m(M\{P\}, \sigma\{P\})$ по аналогии с рисунком 5. Шаги 7 и 8 повторяются для всех варьируемых значений $\sigma\{P\}$ при фиксированном K_δ .

9. Найти оптимальные значения математического ожидания силы сопротивления копанью (рисунок 5), записать в двумерный массив значения $P_{\text{опт}}$. Шаги 5–9 повторяются до получения всех комбинаций значений $(K_\delta, \sigma\{P\})$, варьируемых с заданным шагом, и соответствующих значений $P_{\text{опт}}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результат формирования массива оптимальных значений задающего воздействия

$P_{\text{опт}}$ показан на рисунке 6. Эта зависимость используется как справочная таблица в блоке табличной интерполяции ФЗВ (рисунок 3) 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 табличной интерполяции вычисляется значение $P_{\text{опт}}$, соответствующее точке на поверхности (рисунок 6). Это оптимальное значение силы сопротивления копанью, которое должно поддерживаться системой управления отвалом (рисунок 1) во время следующего рабочего прохода для максимизации технической производительности автогрейдера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе выполнено теоретическое обоснование оптимального задающего воздействия системы управления тяговым режимом автогрейдера, и предложен метод настройки системы автоматического управления отвалом тяжелого автогрейдера в режиме копания грунта.

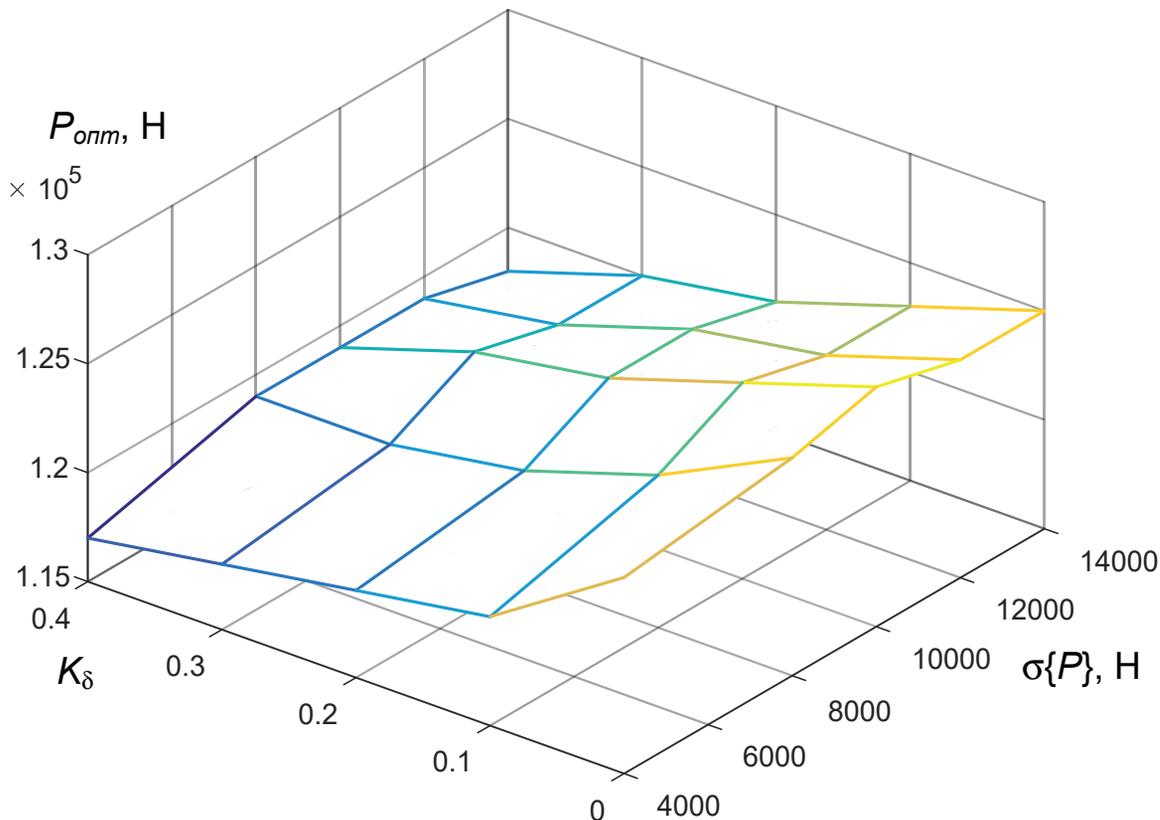


Рисунок 6 – Зависимость оптимального задающего воздействия от среднеквадратического отклонения силы сопротивления копанью и доли времени повышенного буксования

Figure 6 – Dependence of the optimal setpoint on standard deviation of digging force and on excessive slippage time ratio

Источник: составлено авторами

Отличительными особенностями предложенного метода являются:

- оптимальное управление по критерию технической производительности автогрейдера;
- учет динамики и стохастического характера процессов с помощью имитационной модели, использование среднеквадратического отклонения измеренной силы сопротивления копания для настройки системы;
- учет наличия участков грунтовой поверхности с повышенным буксованием колесных движителей и использование вычисленной доли времени повышенного буксования для настройки системы.

Теоретическое обоснование значений оптимального задающего воздействия получено в результате имитационного моделирования тягового режима автогрейдера, полиномиальной аппроксимации зависимостей между моделируемыми показателями процесса, а также решения задачи оптимизации математического ожидания силы сопротивления копания.

Предложена структура системы управления, включающая микропроцессорное управляющее устройство, и алгоритм функционирования формирователя оптимального управляющего воздействия.

Предложен метод оптимальной настройки системы автоматического управления тяговым режимом автогрейдера. Согласно этому методу, оптимальное задающее воздействие (поддерживаемое значение силы сопротивления копания) формируется на основе информации о характеристиках сигналов – измеренных значений силы сопротивления копания и коэффициента буксования движителей во время предыдущего рабочего прохода автогрейдера.

Результаты исследований могут быть использованы в качестве рекомендуемого подхода к разработке и настройке бортовых микропроцессорных систем индикации и управления тяговыми режимами ЗТМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ito N. Bulldozer Blade Control. *Journal of Terramechanics*, 1991, Vol. 28, No. 1, pp. 65–78. DOI: 10.1016/0022-4898(91)90007-S
2. Bulgakov A., Emelianov S., Bock T. and Tokmakov G. Adaptive control of bulldozer's workflows. *Proc. of the 33rd ISARC (Auburn, AL, USA)*. 2016, pp. 90–97. DOI: 10.22260/ISARC2016/0012
3. Nakagami H., Ozaki T., Kure K. Introduction of Bulldozers D155AX-8/AXi-8 // *Komatsu Technical Report*, 2014, Vol. 60, No. 167, 7 pp.

Режим доступа: <http://www.komatsu.com/CompanyInfo/profile/report/pdf/167-E06.pdf>, свободный (дата обращения: 17.08.2018).

4. Денисов В.П. Оптимизация рабочего процесса землеройно-транспортных машин с учетом случайного характера нагрузок: монография. Омск: СибАДИ, 2005. 123 с.

5. Бузин Ю.М. О некорректности в подходе к определению производительности землеройно-транспортной машины и построению на ее основе системы автоматического управления рабочим органом // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2009. № 5 (605). С. 80–83.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. Клец Д. М., Краснокутский М.В., Гацько В.И., Барун М.В. Моделирование рабочих процессов двигателя автогрейдера при работе с неустановившейся нагрузкой // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2017. Т. 4. № 7 (88). DOI: 10.15587/1729-4061.2017.107128

10. Zhao R. Y. and Wang X. Research on power adaptive control method for hydraulic motor grader based on Simulink/AMESim. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vols. 135–136, pp. 793–799. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.135-136.793

11. Ye M. and Lin T. Energy conservation for a motor grader by shifting the engine power curve based on fuzzy adaptive control. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, vol. 7, issue 4. pp. 1–13. DOI: 10.1177/1687814015582116

12. Song Q., Wand W. and Jia C. Research on fuel consumption of hybrid bulldozer under typical duty cycle. *The 2015 Int. Conf. on Mechanical Engineering and Control Systems (MECS2015)*, 2016, pp. 54–57. DOI:10.1142/9789814740616_0012

13. Steckelberg D. and Pacifico A. A methodology for measuring an internal combustion engine performance map using on-board acquisition. *23rd ABCM Int. Congress of*

Mechanical Engineering (Rio de Janeiro, Brazil), 2015. 173 p. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/312577762>, свободный (дата обращения: 17.08.2018).

14. Жулай В.А., Енин В.И., Крестников А.В. Математическое описание скоростных характеристик двигателей строительных и дорожных машин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Материалы межрегиональной научно-практической конференции «Высокие технологии в экологии». 2011. № 1. С. 196–200.

15. Hayashi K., Shimada K. et al. Development of D61EXi/PXi-23 bulldozer with automatic control system of work equipment // Komatsu Technical Report, 2013, Vol. 59, No. 166, 8 pp. Режим доступа: <http://www.komatsu.com/CompanyInfo/profile/report/pdf/166-E02.pdf>, свободный (дата обращения: 17.08.2018).

16. Мещеряков В.А. Нейросетевое адаптивное управление тяговыми режимами землеройно-транспортных машин: монография. Омск: ОмГТУ, 2007. 219 с.

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

18. Жулай В.А., Енин В.И., Кожакин Е.В. Зависимость буксования колесного движителя от силы тяги // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 1. С. 44–45.

19. 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

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

REFERENCES

1. Ito N. Bulldozer Blade Control. *Journal of Terramechanics*, 1991, Vol. 28, No. 1, pp. 65-78. DOI: 10.1016/0022-4898(91)90007-S

2. Bulgakov A., Emelianov S., Bock T. and Tokmakov G. Adaptive control of bulldozer's workflows. *Proc. of the 33rd ISARC* (Auburn, AL, USA), 2016, pp. 90-97. DOI: 10.22260/ISARC2016/0012

3. Nakagami H., Ozaki T., Kure K. Introduction of Bulldozers D155AX-8/AXi-8. *Komatsu Technical Report*, 2014, Vol. 60, No. 167, 7 pp. Access mode: <http://www.komatsu.com/CompanyInfo/profile/report/pdf/167-E06.pdf>, free (application date: 17.08.2018).

4. Denisov V.P. *Optimizatsiya rabocheho processa zemleroyno-transportnykh mashin* [Earthmoving machinery workflow optimization with a glance of stochastic loads]. Omsk, SibADI, 2005, 123 p.

5. Buzin Yu. M. O nekorrektnosti v podkhode k opredeleniyu proizvoditelnosti zemlerono-transportnoy mashiny i postroeniyu na ee osnove sistemy avtomaticheskogo upravleniya rabochim organom [About inconsistency in the way of an earthmover production rate calculation and synthesis of the automatic control system of the working equipment]. *Izvestiya vyshikh uchebnch zavedeniy. Storitelstvo*, 2009, no 5 (605), pp. 80-83.

6. Denisov V.P., Matyash I.I., Zubarev K.V. Issledovanie vliyaniya konstruktivnykh parametrov rabocheho organa avtogreydera na ego proizvoditelnost [Research of the constructive parameters influence of the motor grader working equipment on its performance]. *Vestnik SibADI*, 2015, no 2 (42), pp. 15-19.

7. Nikulin P.I., Buzin Yu.M. Analiz metodov upravleniya processom kopaniya grunta zemleroyno-transportnykh mashin [Analysis of the control methods for digging process of earthmoving machinery]. *Izvestiya vyshikh uchebnch zavedeniy. Storitelstvo*, 2003, no 11 (539), pp. 95-99.

8. Zhulai V.A., Tyunin V.L. and Krestnikov A.V. Otsenka toplivnoy ekonomichnosti samokhodnykh kolesnykh zemleroyno-transportnykh mashin [Fuel economy estimation for self-powered wheeled earthmoving machinery]. *Mekhanizatsiya stroitelstva*, 2016, Vol. 77, no 8, pp. 27-31.

9. Klets D., Krasnokutsky M., Hatsko V. and Barun M. Modeling of operation processes of a motor grader engine during work under unsteady load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 4, no 7 (88). DOI: 10.15587/1729-4061.2017.107128

10. Zhao R. Y. and Wang X. Research on power adaptive control method for hydraulic motor grader based on Simulink/AMESim. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vols. 135-136, pp. 793-799. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.135-136.793

11. Ye M. and Lin T. Energy conservation for a motor grader by shifting the engine power curve based on fuzzy adaptive control. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, vol. 7, issue 4. pp. 1-13. DOI: 10.1177/1687814015582116

12. Song Q., Wand W. and Jia C. Research on fuel consumption of hybrid bulldozer under typical duty cycle. *The 2015 Int. Conf. on Mechanical Engineering and Control Systems (MECS2015)*, 2016, pp. 54-57. DOI:10.1142/9789814740616_0012

13. Steckelberg D. and Pacifico A.A methodology for measuring an internal combustion engine performance map using on-board acquisition. 23rd ABCM Int. Congress of Mechanical Engineering (Rio de Janeiro, Brazil), 2015. 173 p. – Access mode: <https://www.researchgate.net/publication/312577762>, free (application date : 17.08.2018).

14. Zhulai V.A., Yenin V.I. and Krestnikov A.V. Matematicheskoe opisanie skorostnykh kharakteristik dvigateley stroitelnykh i dorozhnykh mashin [Mathematical description of speed characteristics of the building and road machines' engines]. *Nauchny Vestnik VGASU*, 2011, vol. 1, pp. 196-200.

15. Hayashi K., Shimada K. et al. Development of D61EXi/PXi-23 bulldozer with automatic control system of work equipment. *Komatsu Technical Report*, 2013, Vol. 59, no 166, 8 pp. Access mode : <http://www.komatsu.com/CompanyInfo/profile/report/pdf/166-E02.pdf>, free (application date : 17.08.2018).

16. Meshcheryakov V.A. *Neural network based adaptive control of earthmoving machinery workflows*. Omsk: OmGTU, 2007, 219 p.

17. Ulyanov N.A. et al. *Samokhodnye kolesnye zemleroyno-transportnye mashiny [Self-powered wheeled earthmoving machinery]*. M.: Mashinostroenie, 1982. 280 p.

18. Zhulai V.A., Yenin V.I. and Kozhakin E.V. Zavisimost buksovaniya kolesnogo dvizhitelya ot sily tyagi [Dependence of the wheel slippage on the draft force]. *Traktory i selkhoz mashiny*, 2015, no 1, pp. 44-45.

19. Denisov V.P., Meshcheryakov V.A. Issledovanie sistemy avtomaticheskogo upravleniya skorostyu avtogreydera [A study of the automatic motor-grader speed control system]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 2003, no 5, pp. 39-41. EID: 2-s2.0-0038691599

20. Meshcheryakov V.A. and Weber V.V. Metodika obrabotki rezul'tatov eksperimentalnykh issledovaniy tyagovogo rezhima avtogreydera [Methods of processing of the experimental investigation results of the motor grader traction mode]. *Vestnik SibADI*, 2012, no 4 (26), pp. 14-19.

Поступила 20.07.2018, принята к публикации 20.08.2018.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мещеряков Виталий Александрович – доктор технических наук, доцент, ORCID 0000-0001-9913-2078, Scopus Author ID 7006700218, ResearcherID H-2077-2016, ФГБОУ ВО «СибАДИ», проректор по информационным технологиям, профессор кафедры «Техника для строительства и сервиса нефтегазовых комплексов и инфраструктур» (644080, г. Омск, пр. Мира 5, meshcheryakov_va@sibadi.org).

Вебер Виталий Викторович – старший преподаватель кафедры «Техника для строительства и сервиса нефтегазовых комплексов и инфраструктур», ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира 5, veber_vv@sibadi.org).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Meshcheryakov Vitalii – doctor of technical science, ORCID 0000-0001-9913-2078, Scopus Author ID 7006700218, ResearcherID H-2077-2016, Vice Rector of Information Technologies, Professor of the Department “Machinery for Construction and Service of Oil and Gas Complexes and Infrastructures”, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, 5, Mira Ave., meshcheryakov_va@sibadi.org).

Weber Vitalii – Senior Lecturer of the Department “Machinery for Construction and Service of Oil and Gas Complexes and Infrastructures”, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, 5, Mira Ave., veber_vv@sibadi.org).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Мещеряков В.А.: постановка задачи, разработка общей структуры системы, структуры моделей подсистем объекта управления.

Вебер В.В.: реализация моделей, получение результатов вычислительного эксперимента и анализ зависимостей, оптимальная настройка модели управляющего устройства.

AUTHORS CONTRIBUTION

Meshcheryakov V. problem statement, development of the general system structure and sub-models structures of the controlled object.

Weber V. models realization, process simulation and results analysis, optimal tuning of the control unit model.