

УДК 62-529

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-48-60>

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОГРЕЙДЕРА

Р.Ю. Сухарев*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),**г. Омск, Россия**suharev_ry@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2627-8110>*

АННОТАЦИЯ

Введение. Повсеместное внедрение беспилотных технологий достаточно быстро захватывает различные отрасли промышленности и экономики. Беспилотные такси уже передвигаются по улицам городов, в том числе и в нашей стране. Внедрение беспилотных технологий в отрасль строительства, а именно в строительные машины, – это перспективное направление, которое в ближайшие несколько лет будет развиваться достаточно быстрыми темпами. Наиболее близкой по алгоритму управления к беспилотному автомобилю строительной машиной является автогрейдер. Одним из первых этапов создания беспилотного автогрейдера является построение траектории его движения. В данной работе приведены методы управления курсом беспилотной машины, которые могут быть адаптированы для управления автогрейдером.

Материалы и методы. Теоретические исследования были проведены на математической модели рабочего процесса автогрейдера, разработанной с использованием методологии системного анализа и представленной дифференциальными уравнениями 2-го порядка.

Результаты. Предложен критерий эффективности, по которому можно провести сравнение методов управления. Для оценки эффективности представленных методов проведены теоретические исследования математической модели рабочего процесса автогрейдера по предложенному критерию эффективности. Подтверждена эффективность копирного метода управления для различных значений длины базы, коэффициента базы и скорости автогрейдера.

Заключение. Предложенные методы управления могут быть использованы для создания перспективных систем автономного управления движением автогрейдера и других дорожно-строительных машин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автогрейдер, беспилотный, траектория, машина, управление, алгоритм, метод управления, курс, чистое преследование

Статья поступила в редакцию 14.01.2022; одобрена после рецензирования 16.01.2022; принята к публикации 28.02.2022.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Сухарев Р.Ю. методы управления курсом движения беспилотного автогрейдера // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 1(83). С. 48-60. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-48-60>

© Сухарев Р.Ю., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-48-60>
Original article

METHODS OF CONTROLLING THE COURSE FOR AN SELF-DRIVING GRADER

Roman Yu. Sukharev

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia
suharev_ry@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2627-8110>

ABSTRACT

Introduction. The widespread introduction of unmanned technologies quickly captures various industries and economies. Unmanned taxis are already moving through the streets of cities, including in our country. The introduction of unmanned technologies in the construction industry, namely in construction machines is a promising direction that will develop quite rapidly in the next few years. The construction machine closest in terms of control algorithm to an unmanned vehicle is an auto grader. One of the first stages of creating an unmanned grader is the construction of its trajectory. This paper presents methods for controlling the course of an unmanned vehicle, which can be adapted to control the grader.

Materials and methods. Theoretical studies were carried out on a mathematical model of the working process of the grader, developed using the methodology of system analysis and presented by differential equations of the second order.

Results. An efficiency criterion is proposed by which management methods can be compared. To evaluate the effectiveness of the presented methods, theoretical studies of the mathematical model of the working process of the grader were carried out according to the proposed efficiency criterion. The effectiveness of the copier control method for various values of the base length, base coefficient and grader speed has been confirmed.

Conclusion. The proposed control methods can be used to create promising autonomous traffic control systems for graders and other road construction vehicles.

KEYWORDS: grader, unmanned, trajectory, car, control, algorithm, control method, course, pure pursuit

The article was submitted 14.01.2022; approved after reviewing 16.01.2022; accepted for publication 28.02.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Sukharev R.Yu. Methods of controlling the course for an self-driving grader. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (1): 48-60. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-48-60>

© Sukharev R.Y., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Основная задача подсистемы управления движением беспилотной машины – следовать заданному пути, представленному массивом точек, соединенных отрезками линий. Для решения этой проблемы разработано множество различных методов, в основном для небольших двухколесных роботов или автомобилей. Для низкоскоростных машин применимы более простые стратегии управления, в которых возможны допущения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача навигации автогрейдера может быть разделена на глобальную и локальную. Глобальная – это построение траектории до начала работы по данным 3D-проекта и цифровой карты местности. Локальная – это навигация в процессе движения и изменение траектории при возникновении непредвиденных препятствий¹ [1, 2, 3, 5, 6, 9, 13].

Метод управления движением по маршруту должен учитывать не только положение целевой точки траектории, но и гарантировать, что автогрейдер достигнет ее с правильной ориентацией и углом поворота (в отношении ориентации и кривизны траектории в точке обзора)² [1, 2, 3, 4, 6, 9, 13].

Устройство управления курсом движения является подсистемой с двумя входами и двумя выходами векторов параметров [11].

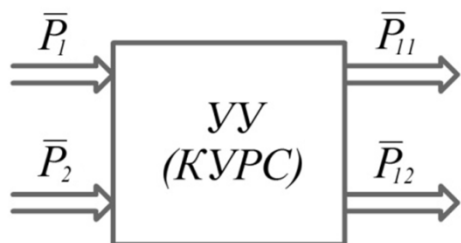


Рисунок 1 – Блок-схема устройства управления курсом.
Составлено автором

Figure 1 – Block diagram of the course control device.
Compiled by the author

Вектор $\bar{P}_1$ является вектором состояния машины (в т. ч. его рабочего оборудования). Вектор $\bar{P}_2$ является заданной траекторией движения машины в виде массива путе-

вых точек или непрерывной траектории вида $Y = f(X)$. Вектор $\bar{P}_{11}$ является управляющим сигналом на рулевое управление, содержащим в себе сигналы α_K и α_P (в зависимости от конкретного типа рулевого управления автогрейдера). Вектор $\bar{P}_{12}$ является управляющим воздействием на силовую установку и трансмиссию автогрейдера и формирует скорость машины $V_{ЗД}$.

Как было рассмотрено ранее, траектория движения автогрейдера представляет собой массив путевых точек, которые он должен проходить в строго определенном порядке. Помимо координат, путевая точка содержит в себе информацию о курсе, на который должен встать автогрейдер после достижения данной точки [11].

Постановка задачи: автогрейдер находится в точке $A_i(x_i, y_i)$, необходимо привести центр задней оси в точку $A_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$. В таком случае возможно применение нескольких различных методов управления [11].

Управление по одной путевой точке

Данный метод широко применяется для управления движением судов и самолетов. Расчетная схема движения автогрейдера представлена на рисунке 2 [16].

Доступными для измерения и вычисления параметрами при таком способе являются: угол поворота передних колес α_K , угол между продольной осью машины и направлением на опорную точку φ_{Ai+1} , курсовой угол φ_K , заданный курсовой угол $\varphi_{K,зад}$, расстояние до опорной точки S_r . Управляемым параметром является угол поворота передних колес α_K [16].

Угол между продольной осью машины и направлением на путевую точку можно вычислить по формуле

$$\varphi_{Ai+1} = \varphi_{K,зад} - \varphi_K. \quad (1)$$

Целевая функция управления при таком способе будет иметь вид

$$\varphi_{Ai+1} \rightarrow 0. \quad (2)$$

Данный метод управления имеет существенный недостаток: при наличии бокового увода траектория машины будет отличаться от прямой линии, т. е. машина не будет возвращаться на прежнюю траекторию [16].

¹ Калоев А. В. Основы проектирования системы автоматического вождения самоходных машин. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.

² Там же

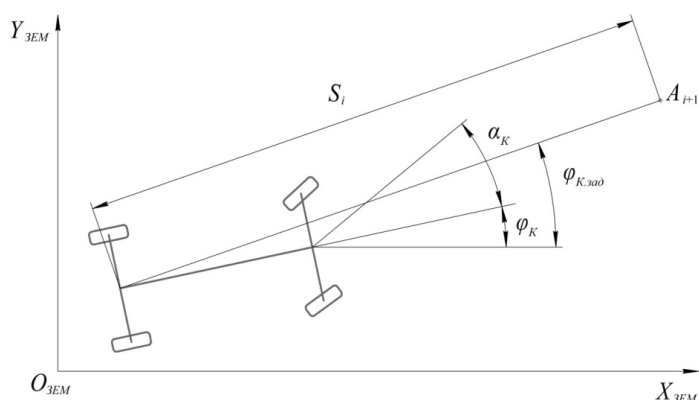


Рисунок 2 – Расчетная схема движения автогрейдера.
Составлено автором

Figure 2 – Grader flow chart.
Compiled by the author

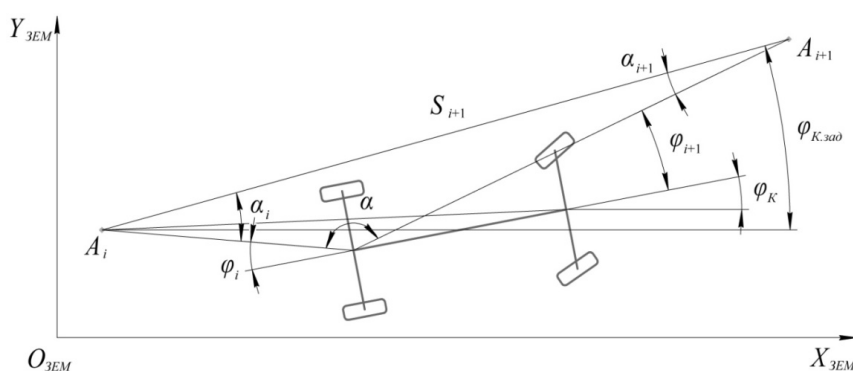


Рисунок 3 – Расчетная схема движения автогрейдера.
Составлено автором

Figure 3 – Motor grader flow diagram.
Compiled by the author

Управление по двум путевым точкам

В данном методе учитывается движение машины между двумя соседними путевыми точками. Расчетная схема представлена на рисунке 3 [16].

Измерены в данном случае могут быть: курсовой угол φ_K , заданный курсовой угол $\varphi_{K,зад}$, углы α , α_i , α_{i+1} , расстояние между точками S_{i+1} , углы между направлениями на следующую φ_{i+1} и предыдущую φ_i опорные точки [16].

Если углы φ_K и $\varphi_{K,зад}$ являются абсолютными, т. е. отсчитываются от оси $O_{3EM} X_{3EM}$, то возможно определить расположение автогрейдера относительно траектории. Если $\varphi_K < (\varphi_K + \varphi_{i+1})$, то траектория находится слева от автогрейдера и поворачивать нужно налево [16].

Целевая функция управления в данном методе управления будет иметь вид

$$\alpha \rightarrow 180^\circ. \quad (2)$$

Управление по непрерывной траектории

Данный метод управления предполагает задание фиксированной траектории на местности в формате $Y = f(X)$.

Существует несколько методов управления по непрерывной траектории: копирный метод, чистое преследование, метод Стэнли.

Копирный метод

Точка копирования – это точка, которую УУ курсом стремится совместить с траекторией. В качестве копирной точки можно использовать центр масс машины, центр переднего моста, центр рабочего органа (РО) или сразу несколько точек. Можно использовать точку, находящуюся вне машины, например на удалении по продольной оси перед машиной. Как правило, она находится на продольной оси машины [16].

Задача управления сводится к совмещению положения копирной точки машины и

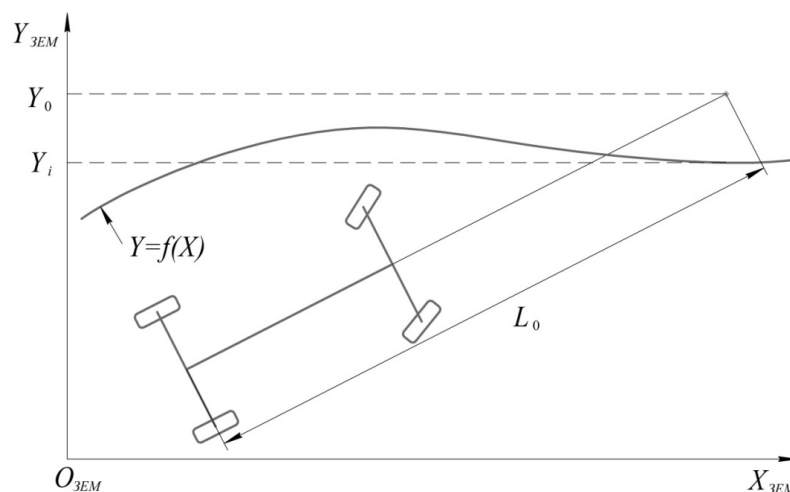


Рисунок 4 – Расчетная схема движения автогрейдера.
Составлено автором

Figure 4 – Grader flow diagram.
Compiled by the author

траектории. Информационным параметром в данном случае является линейное отклонение копирной точки машины ΔY [16].

Расчетная схема метода представлена на рисунке 4.

Метод управления будет основываться на отклонении копирной точки

$$\Delta Y = Y_0 - Y_i. \quad (4)$$

Целевая функция управления при таком методе будет иметь вид

$$\Delta Y \rightarrow 0. \quad (5)$$

Метод управления чистое преследование (Pure Pursuit)

Метод чистого преследования и его разновидности являются одними из наиболее распространенных подходов к проблеме управления курсом движения мобильных роботов. Метод чистого преследования состоит из геометрического расчета радиуса дуги окружности, которая соединяет местоположение задней оси с целевой точкой на траектории впереди машины. Целевая точка определяется исходя из дальности видимости L_0 от центральной точки задней оси до траектории [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

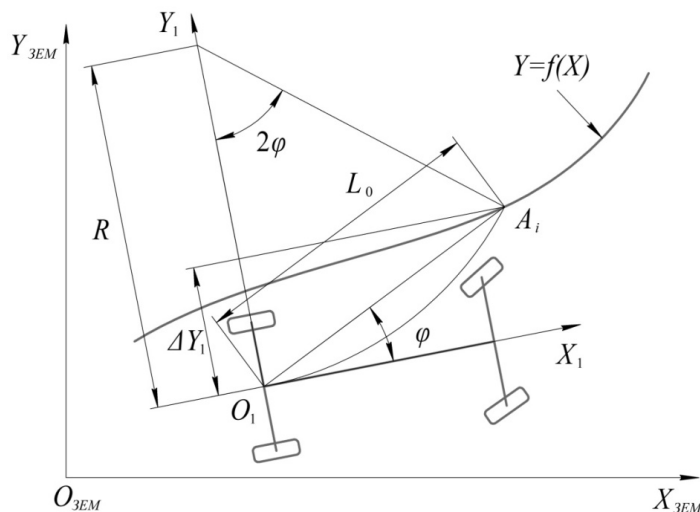


Рисунок 5 – Расчетная схема метода чистое преследование.
Составлено автором

Figure 5 – Net pursuit design.
Compiled by the author

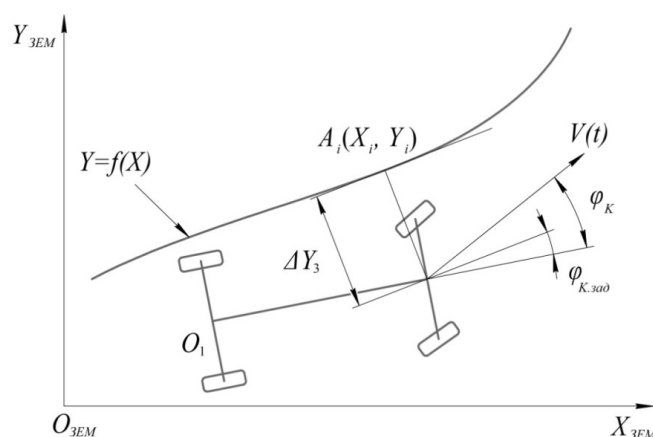


Рисунок 6 – Расчетная схема метода Стэнли.
Составлено автором

Figure 6 – Stanley method design diagram.
Compiled by the author

Угол поворота автогрейдера может быть определен с использованием только местоположения целевой точки и угла φ между вектором курса машины и вектором прогнозирования. Из рисунка 5 можно записать [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10]:

$$\frac{L_0}{\sin 2\varphi} = \frac{R}{\sin(90 - \varphi)}; \quad (6)$$

$$R = \frac{L_0}{2\sin\varphi} = \frac{L_0^2}{2\Delta Y_1}. \quad (7)$$

Необходимый угол поворота автогрейдера можно вычислить, используя соответствующие уравнения для конкретного типа автогрейдера. Например, для автогрейдера с передними поворотными колесами^{3, 4, 5} [14, 18, 19, 21, 24]:

$$\frac{L_0^2}{2\Delta Y_1} = \frac{L}{\operatorname{tg}\alpha_K}. \quad (8)$$

Угол поворота передних колес будет равен

$$\alpha_K = \arctan\left(\frac{2\Delta Y_1 L}{L_0^2}\right) = \arctan(K_{PP}\Delta Y_1). \quad (9)$$

Таким образом, метод чистого преследования является пропорциональным регулятором по ошибке поперечного смещения автогрейдера. Параметром настройки регулятора будет коэффициент K_{PP} .

Метод Стэнли

Метод Стэнли – это метод отслеживания пути, использованный в автомобиле Стэнли (Stanley) Стэнфордского университета на соревновании автономных транспортных средств DARPA Grand Challenge. Метод Стэнли представляет собой нелинейную функцию обратной связи поперечной ошибки ΔY_3 , измеренной от центра передней оси до ближайшей точки пути $A_i(X_i, Y_i)$, для которой может быть показана экспоненциальная сходимость [12].

На рисунке 6 показана расчетная схема метода. Взаимное расположение точки управления с управляемыми передними колесами

³ Горбов, И. А. Планирование траектории движения транспортного средства при обходе препятствия / И. А. Горбов, А. В. Леонард // XXVIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКУС – 2016) : сборник трудов конференции, Москва, 07–09 декабря 2016 года. Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2017. С. 236–239.

⁴ Портнова А. А., Котыкин С. В. Вывод аналитической зависимости радиуса поворота от угла поворота передних управляемых колес автогрейдера / Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации. Омск: СибАДИ, 2016. С. 472–476.

⁵ Калоев А. В. Основы проектирования системы автоматического вождения самоходных машин. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.

позволяет получить интуитивно понятный закон управления, где первый член просто удерживает колеса выровненными по заданной траектории, устанавливая курсовой угол φ_K равным углу касательной $\varphi_{K, \text{зад}}$ к траектории в точке $A_i(X_i, Y_i)$ [12].

Когда ΔY_3 не равно нулю, второй член регулирует φ_K таким образом, чтобы предполагаемая траектория пересекала касательную к траектории. Закон рулевого управления при данном методе имеет вид [12]:

$$\varphi_K = \varphi_{K, \text{зад}} + \arctan\left(\frac{k \cdot \Delta Y_3(t)}{V(t)}\right), \quad (10)$$

где k – коэффициент усиления.

По мере увеличения ΔY_3 колеса все больше будут поворачиваться в сторону траектории.

Критерий эффективности

Управление беспилотным автогрейдером отличается от управления беспилотным автомобилем главным образом целью. Основная цель движения автогрейдера – это перемещение рабочего органа в соответствии с проектом земляного сооружения. Траектории движения базовой машины и ее частей в данном случае вторичны, поэтому в качестве критерия эффективности выбранного метода управления следует использовать отклонение центральной точки РО от траектории [22].

Количественно такой параметр можно оценить с помощью интегрального показателя, т. е. площади между заданной траекторией и траекторией движения центральной точки РО:

$$E_T = \int_0^{\infty} |\Delta x(t)| dt, \quad (11)$$

где $\Delta x = x(\infty) - x(t)$ – отклонение траектории движения центральной точки РО от значения $x(\infty)$, которое соответствует заданной траектории.

Критерий E_T геометрически представляет собой заштрихованную площадь на рисунке 7. Переходный процесс, показанный на рисунке 7, а, вызван возмущением, например ступенчатым изменением заданной траектории. Чем меньше заштрихованная площадь, тем предпочтительнее переходный процесс.

Этот интегральный критерий качества может быть использован не только для оценки качества траектории, но и при синтезе САУ

для оптимизации варьируемых параметров. Абсолютное значение критерия E_T при этом не так важно. Используя готовые выражения для E_T и передаточные функции системы, можно получить зависимости критерия E_T от варьируемых параметров системы управления и найти их оптимальные значения.

Интегральный критерий E_T можно применять к системам, у которых переходные процессы обладают колебательностью и меняют знак (рисунок 7, б).

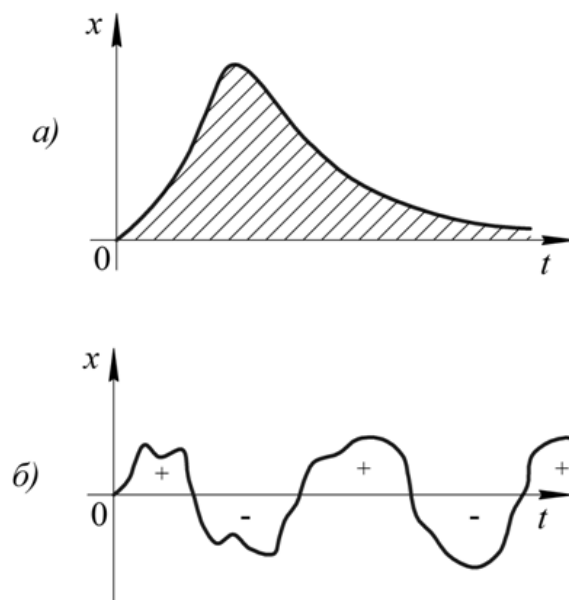


Рисунок 7 – Интегральные критерии качества.
Составлено автором

Figure 7 – Integrated quality criteria.
Compiled by the author

Можно использовать и более сложные интегральные критерии качества, основанные на второй и следующих производных от Δx . Их применение приблизит переходные процессы к кривым второго и более высоких порядков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Теоретические исследования были проведены на математической модели рабочего процесса автогрейдера, разработанной с использованием методологии системного анализа и представленной дифференциальными уравнениями 2-го порядка. Блок-схема математической модели представлена на рисунке 8.

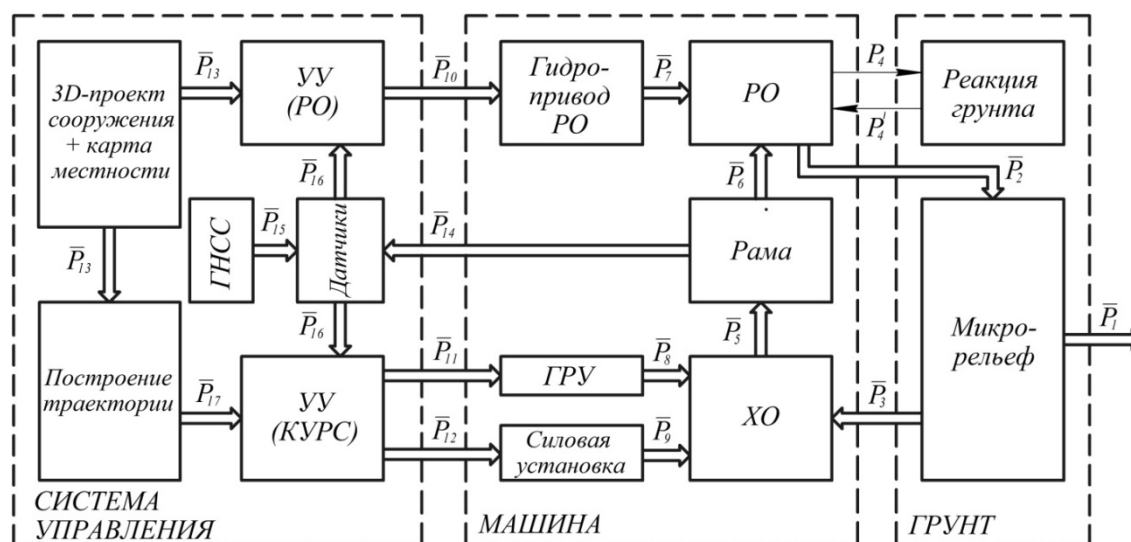


Рисунок 8 – Блок-схема математической модели рабочего процесса автогрейдера.
Составлено автором

Figure 8 – Flow chart of the mathematical model of the autograder working process.
Compiled by the author

Для проведения теоретических исследований необходимо было учесть основные конструктивные параметры, влияющие на движение автогрейдера по траектории, – длина базы и коэффициент баз. Так как в отличие от автомобиля при движении автогрейдера наиболее значимой точкой является центральная точка РО, то необходимо обеспечить именно правильное движение РО, а траектории колес уже вторичны^{6, 7} [11].

Расположение РО относительно передней и задней оси автогрейдера характеризуется показателем коэффициента базы^{8, 9}:

$$K_{\delta} = \frac{L_1}{L}, \quad (11)$$

где L – длина базы автогрейдера, L_1 – расстояние от передней оси до РО.

Проведенные исследования методов чистого преследования и Стэнли показали, что очень важным фактором, влияющим на точность движения автогрейдера по заданной

траектории, является скорость поступательного движения автогрейдера (V). Согласно техническим характеристикам большинство современных автогрейдеров во время рабочего цикла развивают скорость до 6–8 км/ч. В эксперименте скорость изменялась в пределах от 0,5 до 2,5 м/с, что соответствует 1,8 и 9 км/ч.

Варьируемые параметры при исследовании методов управления были разделены на три подгруппы:

1. Конструктивные параметры (длина базы, коэффициент базы).
2. Эксплуатационные параметры (скорость машины).
3. Параметры методов управления.

Полученные результаты были оформлены в виде комплекса поверхностей для различных длин базы, коэффициентов базы и разных значений скорости. Результаты сравнения по критерию эффективности представлены на рисунках 9–13 (1 – метод Стэнли, 2 – метод чистого преследования, 3 – копирный метод).

⁶ Щербаков В. С., Сухарев Р. Ю., Корытов М. С. Развитие теории оптимального управления дорожными и строительными машинами на основе систем спутниковой навигации: монография. Омск: СибАДИ, 2017. 155 с. ISBN 978-5-93204-929-7.

⁷ Щербаков В. С., Портнова А. А., Сухарев Р. Ю. Совершенствование рулевого управления автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой: монография. Омск: СибАДИ. 2016. ISBN 978-5-93204-971-6.

⁸ Там же

⁹ Там же

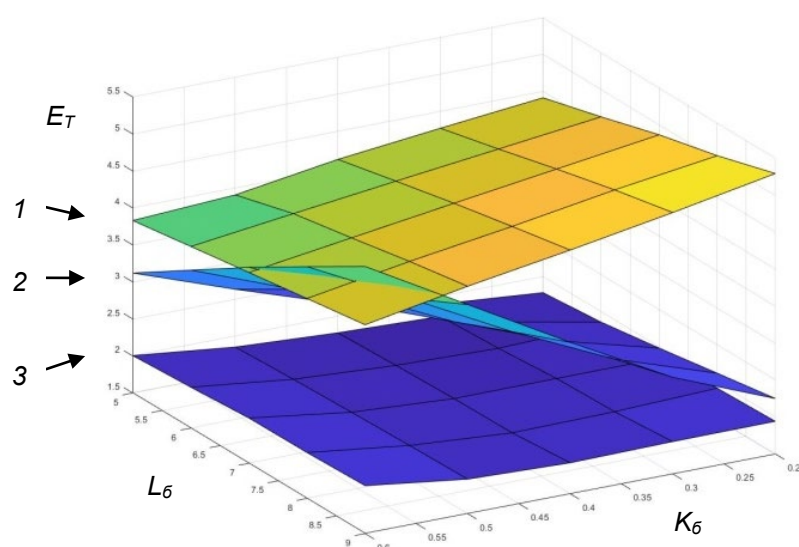


Рисунок 9 – Зависимости интегрального критерия качества различных методов управления от длины базы L_b и коэффициента базы K_b ($V = 0,5$ м/с).
Составлено автором

Figure 9 – Dependencies of the integral quality criterion of the various control methods on the length of L_b base and K_b coefficient ($V = 0.5$ m/s).
Compiled by the author

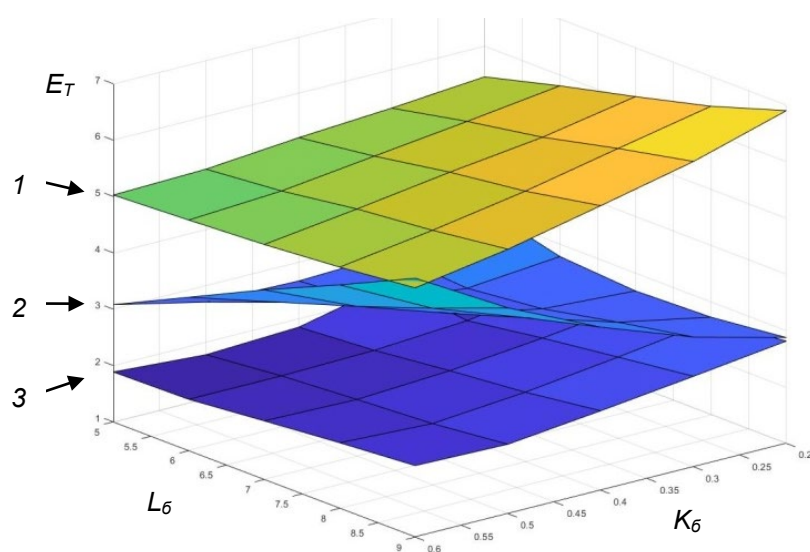


Рисунок 10 – Зависимости интегрального критерия качества различных методов управления от длины базы L_b и коэффициента базы K_b ($V = 1$ м/с).
Составлено автором

Figure 10 – Dependencies of the integral quality criterion of the various control methods on the length of L_b base and K_b coefficient ($V = 1$ m/s).
Compiled by the author

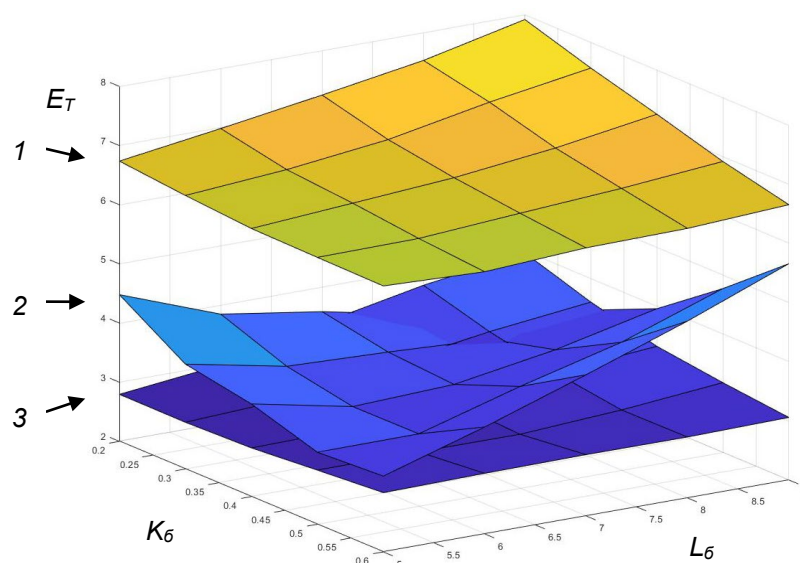


Рисунок 11 – Зависимости интегрального критерия качества различных методов управления от длины базы L_b и коэффициента базы K_b ($V = 1,5$ м/с). Составлено автором

Figure 11 – Dependencies of the integral quality criterion of the various control methods on the length of L_b base and K_b coefficient ($V = 1.5$ m/s). Compiled by the author

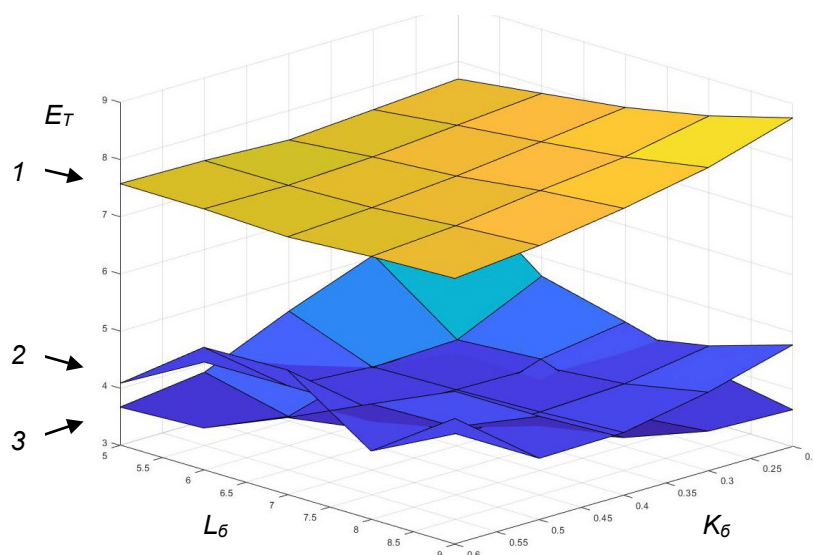


Рисунок 12 – Зависимости интегрального критерия качества различных методов управления от длины базы L_b и коэффициента базы K_b ($V = 2$ м/с). Составлено автором

Figure 12 – Dependencies of the integral quality criterion of the various control methods by length of L_b base and K_b coefficient ($V = 2$ m/s). Compiled by the author

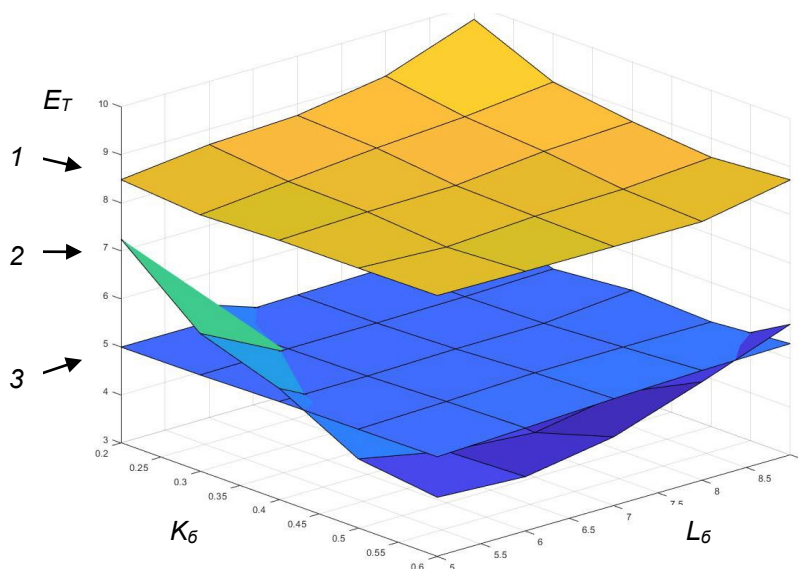


Рисунок 13 – Зависимости интегрального критерия качества различных методов управления от длины базы L_b и коэффициента базы K_b ($V = 2,5$ м/с). Составлено автором

Figure 13 – Dependencies of the integral quality criterion of the various control methods by length of L_b base and K_b coefficient ($V = 2.5$ m/s). Compiled by the author

Из представленных зависимостей можно сделать вывод о наибольшей эффективности копирного метода управления на всех скоростях движения.

ВЫВОДЫ

В статье приведены методы управления курсом движения беспилотной машины, составлены расчетные схемы и целевые функции управления. Предложен критерий эффективности, по которому можно провести сравнение методов и выбор наиболее эффективного. Для оценки эффективности представленных методов проведены теоретические исследования математической модели рабочего процесса автогрейдера по предложенному критерию эффективности. Подтверждена эффективность копирного метода управления для различных значений длины базы, коэффициента базы и скорости автогрейдера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alessandro De Luca, Giuseppe Oriolo. Feedback Control of a Nonholonomic Car-like Robot. 2004.
2. Alexey S. Matveev, Michael C. Hoy, Andrey V. Savkin, A globally converging algorithm for reactive robot navigation among moving and deforming obstacles, Automatica, Volume 54, 2015, Pages

292-304, ISSN 0005-1098, <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.02.012>.

3. Jarrod M. Snider Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking Technical Report CMU-RI-TR-09-08, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, February 2009.

4. Korchagin P.A., Letopolskiy A.B., Teterina I.A. Result of research of working capability of refined pipelayer // Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): proceedings of the international conference, Irkutsk, Russia, 21-26 may 2018 Volume 158. Pp. 416-420. DOI: 10.2991/avent-18.2018.80

5. Lapierre, L., Zapata, R., Lepinay, P. Combined path-following and obstacle avoidance control of a wheeled robot (2007) International Journal of Robotics Research, 26 (4), pp. 361-375. DOI: 10.1177/0278364907076790

6. Matthew J. Barton. Controller Development and Implementation for Path Planning and Following in an Autonomous Urban Vehicle. Undergraduate thesis, University of Sydney, November 2001.

7. Ola Ringdahl. Techniques and Algorithms for Autonomous Vehicles in Forest Environment. Licentiate Thesis. Department of Computing Science Umea University, Sweden, 2007.

8. Omead Amidi. Integrated Mobile Robot Control. Technical Report CMU-RI-TR-90-17, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, May 1990.

9. P.B. Sujit, Srikanth Saripalli, J.B. Sousa. An Evaluation of UAV Path Following Algorithms. 2013

European Control Conference (ECC) July 17-19, 2013, Zurich, Switzerland

10. R. Craig Coulter. Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm. Technical Report CMU-RI-TR-92-01, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, January 1992.

11. R. Yu. Sukharev Trajectory Plotting Algorithm for a Self-Driving Road Grader. Journal of Physics Conference Series 2096(1):012181 DOI:10.1088/1742-6596/2096/1/012181

12. S. Thrum, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny, G. Hoffmann, K. Lau, C. Oakley, M. Palatucci, V. Pratt, P. Stang, S. Strohband, C. Dupont, L.-E. Jendrossek, C. Koelen, C. Markey, C. Rummel, J. van Niekerk, E. Jensen, P. Alessandrini, G. Bradski, B. Davies, S. Ettinger, A. Kaehler, A. Nefian, and P. Mahoney. Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge. Journal of Field Robotics 23 (9), 661-692. 2006.

13. Артеменко М. Н., Корчагин П. А., Тетерина И. А. Тенденции развития мобильных беспилотных роботизированных комплексов. Опыт отечественных и зарубежных производителей // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16. № 4(68). С. 416–430.

14. Воскресенский Г. Г., Вербицкий Г. М. Моделирование движения автогрейдера по кривой // Ученые заметки ТОГУ. 2018. Т. 9, № 2. С. 690–698.

15. Дерюшев В. В., Косенко Е. Е., Косенко В. В. Оценка параметров безопасности автогрейдера при маневрировании в улично-дорожной сети // Безопасность техногенных и природных систем. 2020. № 3. С. 33–38. DOI 10.23947/2541-9129-2020-3-33-38.

16. Нгуен Т. З., Щербаков И. А., Проталинский О. М. Построение траектории движения мобильного робота в зданиях и сооружениях // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2016. № 1(83). С. 79–81.

17. Портнова А. А. Задача минимизации радиуса поворота автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях. 2014. С. 97–99.

18. Сухарев Р. Ю. Математические модели процессов поворота колесных дорожно-строительных машин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. № 3. С. 259–269. DOI 10.22281/2413-9920-2021-07-03-259-269.

19. Сухарева С. В., Сухарев Р. Ю. Обоснование интегральных критериев качества земляных работ, выполненных цепными траншейными экскаваторами // Вестник СибАДИ. 2015. № 5(45). С. 52–55.

REFERENCES

1. Alessandro De Luca, Giuseppe Oriolo. Feedback Control of a Nonholonomic Car-like Robot. 2004.

2. Alexey S. Matveev, Michael C. Hoy, Andrey V. Savkin, A globally converging algorithm for reactive robot navigation among moving and deforming obstacles, Automatica, Volume 54, 2015, Pages 292-304, ISSN 0005-1098, <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.02.012>.

3. Jarrod M. Snider Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking Technical Report CMU-RI-TR-09-08, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, February 2009.

4. Korchagin P.A., Letopolskiy A.B., Teterina I.A. Result of research of working capability of refined pipelayer // Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): proceedings of the international conference, Irkutsk, Russia, 21-26 may 2018 Volume 158. Pp. 416-420. DOI: 10.2991/avent-18.2018.80

5. Lapiere, L., Zapata, R., Lepinay, P. Combined path-following and obstacle avoidance control of a wheeled robot (2007) International Journal of Robotics Research, 26 (4), pp. 361-375. DOI: 10.1177/0278364907076790

6. Matthew J. Barton. Controller Development and Implementation for Path Planning and Following in an Autonomous Urban Vehicle. Undergraduate thesis, University of Sydney, November 2001.

7. Ola Ringdahl. Techniques and Algorithms for Autonomous Vehicles in Forest Environment. Licentiate Thesis. Department of Computing Science Umea University, Sweden, 2007.

8. Omead Amidi. Integrated Mobile Robot Control. Technical Report CMU-RI-TR-90-17, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, May 1990.

9. P.B. Sujit, Srikanth Saripalli, J.B. Sousa. An Evaluation of UAV Path Following Algorithms. 2013 European Control Conference (ECC) July 17-19, 2013, Zurich, Switzerland

10. R. Craig Coulter. Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm. Technical Report CMU-RI-TR-92-01, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, January 1992.

11. R. Yu. Sukharev Trajectory Plotting Algorithm for a Self-Driving Road Grader. Journal of Physics Conference Series 2096(1):012181 DOI:10.1088/1742-6596/2096/1/012181

12. S. Thrum, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny, G. Hoffmann, K. Lau, C. Oakley, M. Palatucci, V. Pratt, P. Stang, S. Strohband, C. Dupont, L.-E. Jendrossek, C. Koelen, C. Markey, C. Rummel, J. van Niekerk, E. Jensen, P. Alessandrini, G. Bradski, B. Davies, S. Ettinger, A. Kaehler, A. Nefian, and P. Mahoney. Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge. Journal of Field Robotics 23 (9), 661-692. 2006.

13. Artemenko, M. N. Trends in the development of mobile unmanned robotic complexes. experience of domestic and foreign manufacturers / M. N. Artemenko, P. A. Korchagin, I. A. Teterina // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019. 16. 4(68): 416-430.

14. Voskresensky G.G., Verbitsky G.M. Modeling of grader movement along a curve / Scientific notes of TOGU. - 2018. 9(2): 690-698.

15. Deryushev V.V., Kosenko E.E., Kosenko V.V. Assessment of the safety parameters of the grader when maneuvering in the road network / Safety of technogenic and natural systems. 2020. 3: 33-38. DOI 10.23947/2541-9129-2020-3-33-38.

16. Nguyen, T. Z. creation of a trajectory of movements of a mobile robot in buildings and structures / T. H. Nguyen, I. A. Shcherbatov, O. M. Protalinski // Mathematical methods in engineering and technology - mmtt. 2016. 1(83): 79-81.

17. Portnov, A. A. the Problem of minimizing the turning radius grader with articulated / Innovation, quality and service in engineering and technology. - Kursk: Closed Joint Stock Company "University Book", 2014. - pp. 97-99.

18. Sukharev, R. Yu. Mathematical models of the processes of turning wheeled road-building machines / R. Yu. Sukharev // Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University. 2021. 3: 259-269. - DOI 10.22281/2413-9920-2021-07-03-259-269.

19. Sukhareva, S. V. Substantiation of integral criteria for the quality of earthworks performed by chain

trench excavators / S. V. Sukhareva, R. Yu. Sukharev // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal* 2015. 5(45): 52-55.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сухарев Роман Юрьевич – канд. техн. наук, доц.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Roman Yu. Sukharev, Cand. of Sciences, Associate Professor, the Automation of Production Processes and Electrical Engineering Department, Associate Professor.