

## ЗАДАЧА СТАБИЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ

УДК 629.053

**Бузников С.Е.**<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент,

**Ендачев Д.В.**<sup>2</sup>, кандидат технических наук,

**Елкин Д.С.**<sup>3</sup>,

**Струков В.О.**<sup>4</sup>,

Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное  
унитарное предприятие «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-  
исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»  
(ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»), ул. Автомоторная, 2, 125438, Москва, Российская Федерация,  
e-mail: vladislav.strukov@nami.ru

Аннотация. В настоящее время усилия многих ведущих зарубежных фирм сосредоточены на создании образцов беспилотного транспорта для перевозки грузов и пассажиров. Среди множества практических задач, возникающих при решении проблемы создания беспилотных транспортных средств задача стабилизации на заданной траектории занимает центральное место. Целью данной научной работы является формализация рассматриваемой задачи в терминах квадратичного функционала качества управления, сравнительный анализ возможных решений и обоснование выбора оптимального технического решения. В качестве квадратичного функционала качества управления для конечного временного интервала предлагается использовать интеграл квадрата отклонения от заданной траектории. Наилучшим решением задачи в предложенной постановке будет являться алгоритм регулятора курса, обеспечивающий близкое к нулю отклонение, реализованный в программно-аппаратной среде, удовлетворяющей системе ограничений на технико-экономические показатели. Для генерации множества вариантов программно-аппаратных решений используется метод «морфологического ящика» Цвикки в пространствах аппаратных и программных средств. Алгоритм управления курсом использует данные об угле поворота управляемых колес и величине отклонения от центра полосы (заданной траектории), вычисляемой по данным решения навигационной задачи и данным видеосистемы. В случае, когда видеосистема не обнаруживает разметку, управление осуществляется по данным колесной навигационной системы, а в случае распознаваемой разметки – по данным видеосистемы. Анализ результатов испытательных тестов позволяет сделать вывод об эффективности применения алгоритмов комплексированной навигационной системы, обеспечивающей квазиоптимальное решение поставленной задачи при соблюдении жестких функциональных ограничений на технико-экономические показатели разрабатываемой системы управления беспилотного транспортного средства.

Ключевые слова: квадратичный функционал качества управления, регулятор курса, технико-экономические показатели, компенсация запаздываний, комплексированная навигационная система.

---

<sup>1</sup> Заведующий сектором управления интеллектуальных систем ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», e-mail: sergey.buznikov@nami.ru.

<sup>2</sup> Директор Центра информационных и интеллектуальных систем ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», e-mail: denis.endachev@nami.ru

<sup>3</sup> Ведущий инженер-программист управления интеллектуальных систем ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», e-mail: dmitry.elkin@nami.ru.

<sup>4</sup> Инженер управления интеллектуальных систем ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», e-mail: vladislav.strukov@nami.ru.

## Введение

В настоящее время усилия многих ведущих зарубежных автомобильных фирм сосредоточены на создании образцов беспилотного транспорта для перевозки грузов и пассажиров. Среди множества практических задач, возникающих при решении проблемы создания беспилотных транспортных средств центральное место занимают задачи предотвращения столкновений и стабилизации на заданной траектории.

Очевидно, что без их успешного решения прогнозы практического использования беспилотного транспорта лишены смысла.

**Целью данного научного исследования** является формализация задачи стабилизации на траектории в терминах квадратичного функционала качества управления, сравнительный анализ возможных решений и обоснование выбора оптимального технического решения.

## Постановка задачи управления

В качестве квадратичного функционала качества управления на конечном временном интервале  $(t_1 \div t_2)$  предлагается использовать выражение  $Q(t_2)$ :

$$Q(t_2) = \int_{t_1}^{t_2} C_0 [\Delta H(\tau)]^2 d\tau, \quad (1)$$

где  $\Delta H(\tau)$  – отклонение от заданной траектории;  $C_0 > 0$  – масштабный коэффициент.

С учетом того, что управляющее воздействие  $U(t)$  ограничено по модулю, а его реализация выполняется в программно-аппаратной среде:  $R = (R_H, R_S)^T$ , которая должна удовлетворять некоторому набору ограничений на технико-экономические показатели  $q_i(R)$ , задача оптимального управления формулируется в виде:

$$Q(t_2) = \int_{t_1}^{t_2} C_0 [\Delta H(\tau)]^2 d\tau \Rightarrow \min, \quad (2)$$

при  $U \in U_{\text{доп}}$ ;  $R \in R_{\text{доп}}$ ,  $q_i(R) \leq q_{i\text{доп}}$ ,  $i \leq i \leq r$ , где  $U_{\text{доп}}$  и  $R_{\text{доп}}$  – допустимые множества управляющих воздействий и технических решений.

К числу основных технико-экономических показателей  $q_i(R)$  относятся: уровень потребляемой мощности, влияние реальных внешних факторов, отказоустойчивость, затраты на эксплуатацию, стоимость программно-аппаратного комплекса.

Для генерации множества вариантов программно-аппаратных решений используется метод «морфологического ящика» Цвикки [1] в пространстве аппаратных  $R_H$  и программных  $R_S$  средств.

Минимизация квадратичного функционала качества управления при выполнении функциональных ограничений (2) на технико-экономические показатели системы управления должна выполняться за счет ограниченного управляющего воздействия на управляемые колеса, задающие изменение курса транспортного средства.

Наилучшим решением задачи в предложенной постановке будет являться алгоритм регулятора курса, обеспечивающий близкое к нулю отклонение от траектории, реализованный в программно-аппаратной среде, удовлетворяющей системе ограничений на технико-экономические показатели.

### **Результаты решения задачи стабилизации на заданной траектории**

Задача управления условно разбивается на две независимые: построение заданной траектории и стабилизация движения по траектории.

Для решения первой задачи могут использоваться: прокладка маршрута [2] по электронной карте местности; запись маршрута по данным спутниковых, инерциальных и одометрических (колесных) навигационных систем.

Для решения второй задачи также могут использоваться приведенные навигационные системы для определения положения и ориентации беспилотного транспортного средства [3], а также видеосистемы, позволяющие определять положение объекта на полосе движения в условиях видимой разметки.

Выходными данными навигационных систем, построенных на различных принципах, как при построении заданной траектории, так и при стабилизации на ней, являются оценки курса  $\hat{\Psi}_m(t)$  и положения объекта  $\hat{L}_y(t)$  и  $\hat{L}_x(t)$  в декартовой системе координат.

Оценки  $\hat{\Psi}_m(t)$ ,  $\hat{L}_y(t)$  и  $\hat{L}_x(t)$  наряду с истинными значениями содержат шумы измерений определенной физической природы в форме влияния реальных внешних факторов.

#### **1. Сравнительный анализ возможных технических решений.**

Для решения задачи стабилизации беспилотного транспортного средства на траектории в состав системы управления могут включаться различные навигационные системы. На точность определения положения объекта при этом оказывают влияние различные факторы.

Так, например, спутниковые навигационные системы (СНС) не обеспечивают решения навигационной задачи в условиях ограниченной радиовидимости (в тоннелях, в плотной застройке, в зоне высоких деревьев и др.), а также в условиях электромагнитных шумов.

Инерциальные навигационные системы (ИНС), принцип действия которых основан на интегрировании ускорений и угловых скоростей по ортогональным осям, характеризуются накоплением ошибок по мере увеличения длины маршрута и влиянием неровностей дорожного покрытия и бездорожья.

Колесная навигационная система (КНС), принцип действия которой основан на интегрировании скорости центра масс  $V_m$  и угла поворота управляемых колес  $FiC$ , также характеризуется накоплением ошибок интегрирования и влиянием неровностей дорожного покрытия на результаты решения навигационной задачи.

Видеосистема обнаружения разметки (BCOP) предназначена для определения отклонения продольной оси транспортного средства от середины полосы. Применение данной системы ограничивается условиями освещенности полосы движения, наличием осадков и распознаваемой разметки.

В таблице 1 приведены результаты качественного сравнительного анализа влияния реальных внешних факторов на работоспособность рассмотренных навигационных систем. Знаками «-» отмечено негативное влияние на работоспособность НС, знаком «+» – отсутствие негативного влияния.

Таблица 1 – Качественная оценка влияния реальных факторов на работоспособность НС

Факторы влияния	Навигационная система			
	СНС	ИНС	КНС	BCOP
Ограниченная радиовидимость	-	+	+	+
Электромагнитные помехи	-	+	+	+
Негладкие покрытия, бездорожье	+	-	-	+
Уровень освещенности, осадки	+	+	+	—
Увеличение длины маршрута	+	-	-	+
Отсутствие разметки	+	+	+	-
Выражи с радиусами менее 20 м	+	+	+	-
Движение задним ходом	+	+	—	-

Анализ влияния реальных внешних факторов на работоспособность навигационных систем показывает, что ни одна из рассмотренных систем не обеспечивает решения поставленной задачи в условиях городского движения.

Очевидно, что для получения приемлемого результата необходимо комплексирование двух или более навигационных систем различного принципа действия. С точки зрения стоимости дополнительного оборудования комплексированная система КНС + BCOP имеет заметные преимущества перед остальными вариантами. В случае движения по локальным траекториям ограниченной длины по гладким покрытиям без использования заднего хода достаточно использования только КНС. В более сложных условиях движения возможно

использование комплексированной навигационной системы СНС + КНС + ВСОР более высокой стоимости.

## 2. Система дифференциальных уравнений движения центра масс.

Для решения навигационной задачи беспилотного транспортного средства в декартовой системе координат используется следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \dot{L}_y = V_m \cos \Psi_m; \\ \dot{L}_x = V_m \sin \Psi_m; \\ \dot{\Psi}_m = \omega_m + \Delta \omega_m, \end{cases} \quad (3)$$

где  $V_m$  – продольная скорость центра масс ( $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ),  $\Psi_m$  – курсовой угол (рад),  $\omega_m$  – угловая частота вращения центра масс на вираже ( $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$ ),  $\Delta \omega_m$  – дополнительная составляющая угловой частоты вращения центра масс при заносах и сносах колес ( $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

Решение системы уравнений (3) движения центра масс с учетом формулы Эйлера для  $\omega_m = V_m R_m^{-1}$  и  $R_m = b FiC^{-1}$ , где  $R_m$  – радиус виража,  $b$  – колесная база автомобиля, получим в виде:

$$\begin{cases} L_y(t) = \int_{t_0}^t V_m(\tau) \cos \Psi_m(\tau) d\tau + L_y(t_0); \\ L_x(t) = \int_{t_0}^t V_m(\tau) \sin \Psi_m(\tau) d\tau + L_x(t_0); \\ \Psi_m(t) = b^{-1} \int_{t_0}^t V_m(\tau) FiC(\tau) d\tau + \int_{t_0}^t \Delta \omega_m(\tau) d\tau + \Psi_m(t_0), \end{cases} \quad (4)$$

где  $L_y(t_0)$ ,  $L_x(t_0)$ ,  $\Psi_m(t_0)$  – начальные значения координат и курса в момент времени  $t_0$ .

Для решения системы (4) требуются высокоточные измерения  $V_m$ ,  $FiC$  и  $\Delta \omega_m$ , которые могут выполняться либо с помощью специализированных, либо с помощью виртуальных датчиков информации [4]. Последний вариант технического решения является предпочтительным, так как снижает практически все технико-экономические показатели, включая стоимость и затраты на обслуживание.

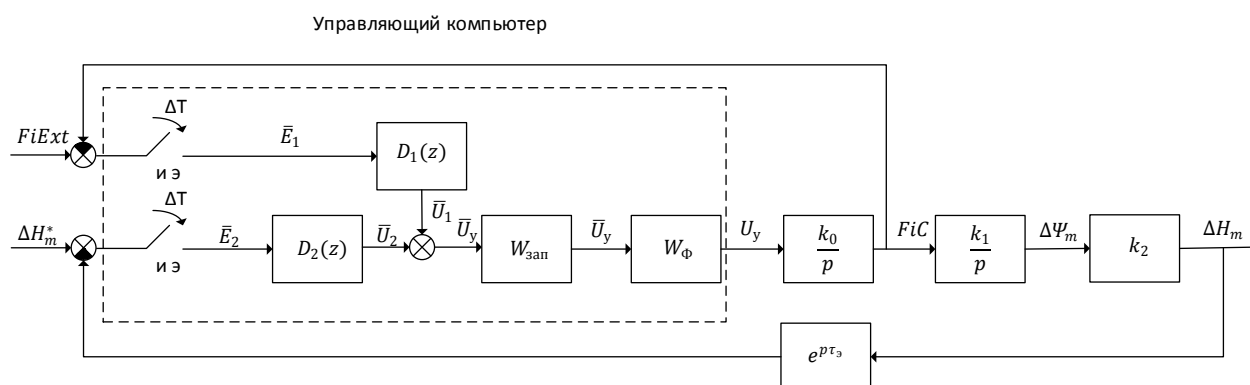
## 3. Система стабилизации на траектории.

Для решения задачи стабилизации беспилотного транспортного средства на заданной траектории была разработана двухконтурная компьютерная система управления, использующая данные колесной навигационной системы и видеосистемы обнаружения разметки. Первый контур управления должен обеспечивать повторение заданного курса, второй – уменьшать отклонение от заданной траектории при движении параллельными курсами.

В состав вычислительной части системы входят 3 компьютера, объединенные в разнородную сеть обмена телеметрической информацией и командами управления. Первый обеспечивает первичную обработку информации от датчиков частот вращения колес и ее преобразование в параметры движения и управление электронными ключами для коммутации двигателя электроусилителя руля. Второй компьютер выполняет решение навигационной

задачи, формирует управляющие воздействия на электроусилитель руля и служит пультом управления системой. Интерфейс сети между первым и вторым компьютерами реализован на протоколе Bluetooth, используя стек Bluetooth RFCOMM (Radio Frequency Communication). Третий компьютер выполняет задачу обработки изображений телевизионной камеры для обнаружения разметки, определения центра полосы и отклонения от нее продольной оси автомобиля. Передача телеметрической информации между третьим и первым компьютерами выполняется по последовательному интерфейсу.

Ниже приведена эквивалентная схема двухконтурной системы стабилизации на траектории (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Эквивалентная схема двухконтурной компьютерной системы стабилизации на траектории**

#### 4. Одношаговый регулятор угла поворота управляемых колес.

Первый контур управления содержит электрический двигатель усилителя рулевого управления, подключенный к реверсивным электронным ключам, управляемым компьютером. Программа регулятора реализована на навигационном компьютере, который принимает информацию от первого о параметрах движения, скорости и угле поворота управляемых колес, формирует и передает управляющие воздействия на первый, подключенный к электронным ключам с ШИМ-сигналом.

Компьютерная часть системы содержит импульсный элемент (ИЭ), выполняющий квантования сигналов по времени с периодом  $\Delta T$ , передаточную функцию регулятора  $D_1(z) = k_p$ , элемент запаздывания  $W_{\text{зап}}(p) = e^{-p\Delta T}$  на время обмена данными с навигационным компьютером, фиксатор с передаточной функцией  $W_{\Phi}(p)$ . Непрерывная часть системы в виде реверсивного двигателя электроусилителя руля представляется интегрирующим звеном  $W_d = k_0 p^{-1}$  с коэффициентом усиления  $k_0$ , связывающим выходной сигнал в виде угла поворота  $FiC$  с входным в виде напряжения управления  $U_y$ .

Конечно-разностное уравнение двигателя в дискретном времени можно представить следующим образом:

$$FiC(k) = FiC(k - 1) + \Delta T k_0 U_y(k - 1). \quad (5)$$

В случае использования пропорционального регулятора с коэффициентом усиления  $k_p$  с учетом запаздывания на шаг  $\Delta T$  получается следующее уравнение:

$$U_1(k - 1) = k_p [FiExt(k - 2) - FiC(k - 2)]. \quad (6)$$

Уравнение динамики  $FiC(k)$  с учетом (5) и (6) приводится к виду:

$$FiC(k) = FiC(k - 1) - \Delta T k_p k_0 FiC(k - 2) + \Delta T k_p k_0 FiExt(k - 2). \quad (7)$$

Учитывая, что на интервале времени паузы ключи переводят двигатель в режим динамического торможения и  $FiC(k - 1) \approx FiC(k - 2)$ , и если  $k_p = (k_0 \Delta T)^{-1}$ , то

$$FiC(k) = FiExt(k - 2).$$

Для компенсации запаздывания задающее значение  $FiExt$ , записанное для заданной траектории, сдвигается на два шага вперед с линейной аппроксимацией промежуточных значений, и в этом случае  $FiC(k) \approx FiExt(k)$  – и влияние запаздывания полностью компенсируется.

### 5. Стабилизатор отклонения от траектории.

Стабилизация отклонения от заданной траектории выполняется на участках, близких к прямым  $|FiExt| \leq \Psi_{гр}$ , также за счет управления реверсивным двигателем электроусилителя руля по второму контуру (см. рисунок 1).

Эквивалентная схема компьютерной системы стабилизации отклонения от траектории включает три дополнительных звена: интегратор изменения курса  $\Delta \Psi_m$ , звено пропорционального изменения отклонения  $\Delta H_m$  и звено экстраполяции его значений с коэффициентами:  $k_1 = b^{-1} V_m$ ;  $k_2 = V_m \Delta T$  и  $\tau_3$  соответственно. Исходная система в непрерывной части содержит два последовательно включенных интегратора и потенциально может быть склонна к незатухающим колебаниям. Для придания системе экспоненциальной устойчивости используется дифференциальный регулятор с  $D_2(z) = k_c k_{общ}^{-1} (1 - z^{-1}) \Delta T^{-1}$ :

$$U_2(k) = [U(k) - U(k - 1)] \Delta T^{-1}, \quad (8)$$

где  $U(k) = k_c k_{общ}^{-1}(k) E(k)$ ;  $k_{общ} = b^{-1} V_m(k) \Delta T k_0$ ;  $E(k) = \Delta H_m^*(k) - \Delta \hat{H}_m(k)$ ;  $k_c$  – настраиваемый коэффициент.

Оценка текущего значения отклонения от траектории  $\Delta H_m$  определяется по данным КНС и ВСОР из условия:

$$\Delta \hat{H}_m(k) = \begin{cases} \Delta H_{TV}, \text{ если } |\Delta H_{TV}| \leq E_1 \text{ и } |\Delta H_N| \leq E_2 \text{ и } |FiExt| \leq E_3; \\ \Delta H_N - \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad (9)$$

где  $\Delta H_{TV}$  – отклонение от траектории по данным ВСОР (м);  $\Delta H_N$  – отклонение от траектории по данным КНС (м);  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$  – настраиваемые параметры.

Компенсация запаздывания, вносимого программами обмена данными, достигается путем экстраполяции отклонений от центра полосы за счет определения дистанции, на которой оценивается середина полосы:

$$\Delta L_d = \begin{cases} \Delta L(V_m), & \text{если } \Delta L(V_m) > \Delta L_{\min}; \\ \Delta L_{\min}, & \text{если } \Delta L(V_m) \leq \Delta L_{\min}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\Delta L(V_m) = V_m \tau_{\text{э}} - \Delta L_{\text{н}}$  (м);  $\Delta L_{\text{н}}$  – расстояние от переднего бампера до центра масс (м);  $\Delta L_{\min}$  – минимальная дистанция распознаваемой разметки (м).

Отклонение  $\Delta H_N$  определяется как высота навигационного треугольника, настроенного по двум ближайшим точкам заданной траектории и точкой текущего положения, определяемой по КНС.

### Экспериментальные результаты

Исследовательские испытания системы стабилизации на заданной траектории проводились на территории ФГУП «НАМИ», включая Дмитровский автополигон.

Тестовые заезды производились на автомобиле Лада Калина с электротягой. В составе системы управления использовались:

- штатные датчики частот вращения колес системы АБС;
- штатный электроусилитель рулевого управления;
- видеокамера oCam-5CR0-U, установленная в салоне на лобовом стекле;
- микрокомпьютер ODROID-XU4;
- блок обработки первичной информации и управления;
- планшетный компьютер, реализующий функции КНС и пульта управления;
- автономный источник питания системы управления.

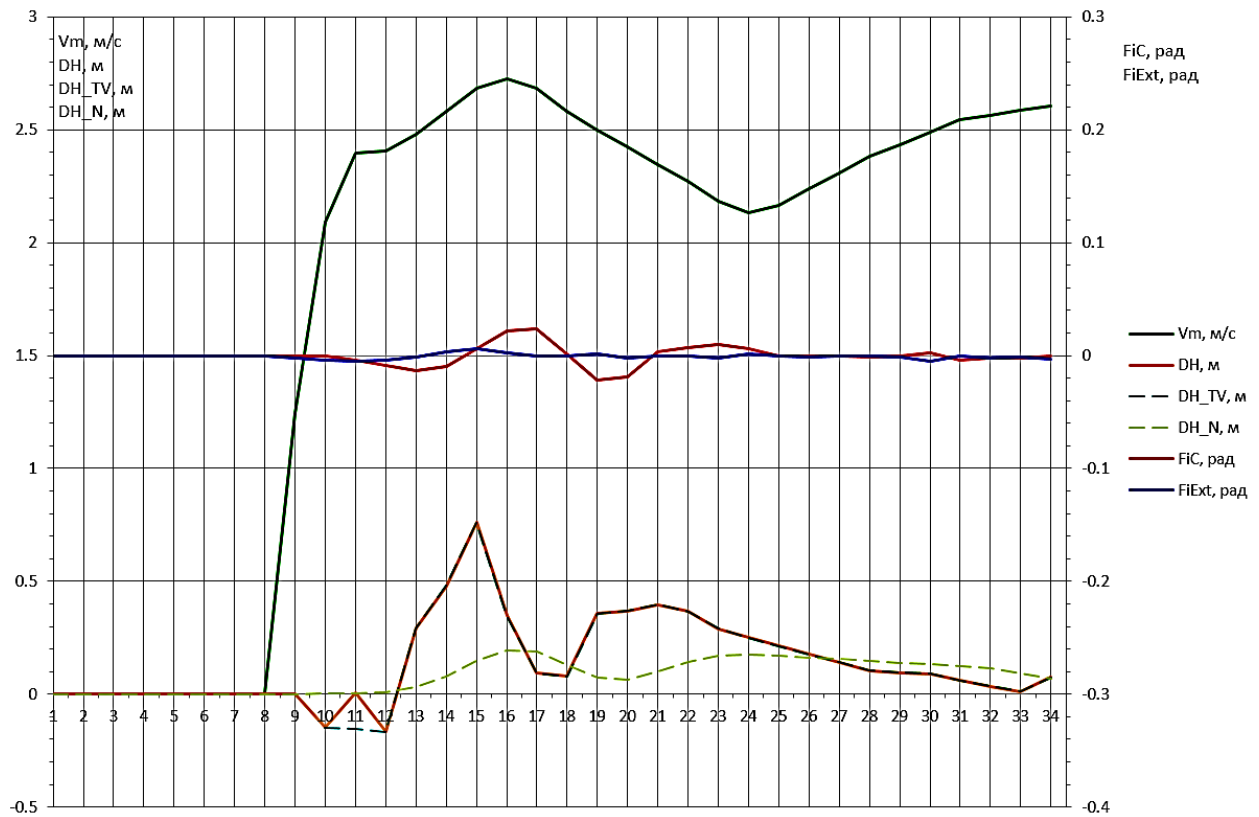
На рисунке 2 приведен кадр видеопотока тестового заезда по замкнутому маршруту, состоящему из прямолинейного участка с распознаваемой разметкой, левого разворота без разметки на 180° и прямолинейного участка с разметкой, возвратного к точке старта. Отклонение от центра полосы  $\Delta H_{TV}$  определяется как разность координат продольной оси автомобиля и центра полосы.





**Рисунок 2 – Кадр видеопотока с прямолинейным участком с распознаваемой разметкой**

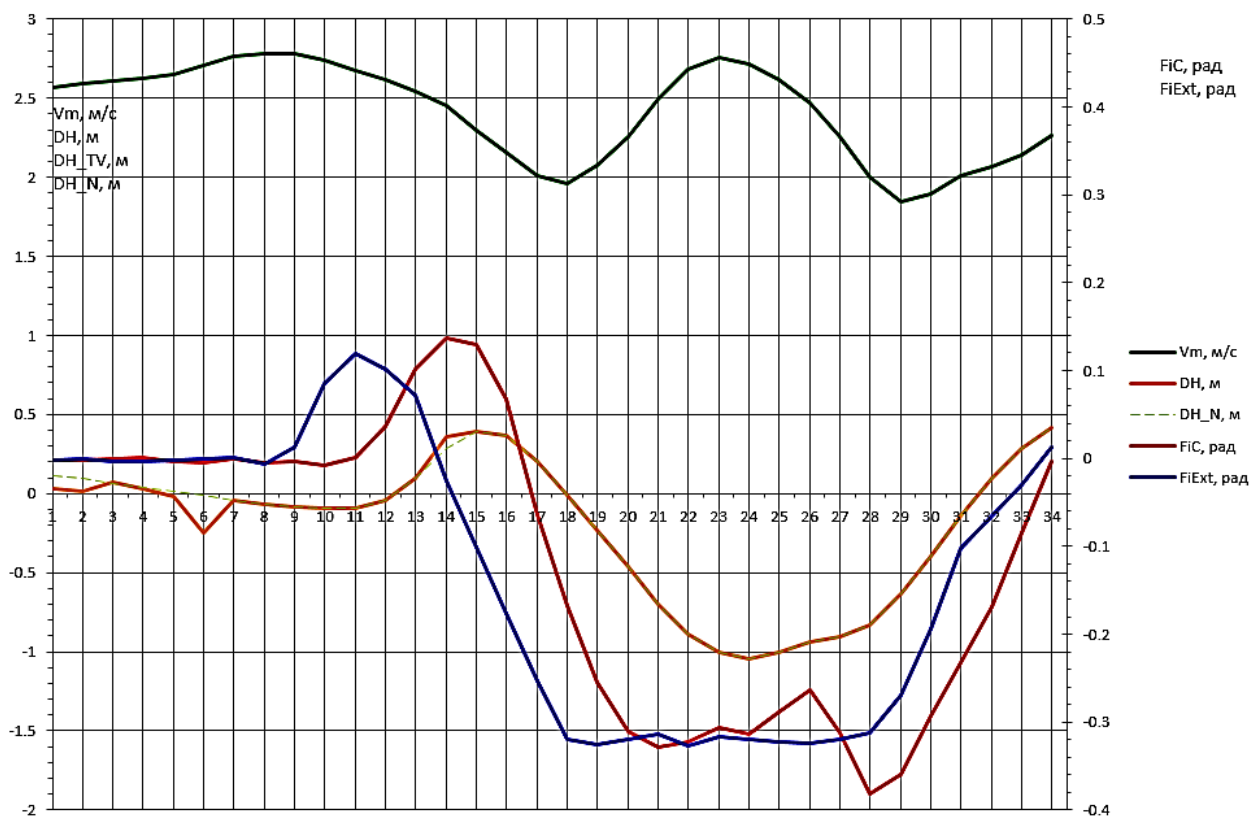
Характер изменений параметров движения во времени на прямолинейном участке с распознаваемой разметкой можно проследить на нижепредставленном рисунке 3.



**Рисунок 3 – Временные диаграммы параметров движения на прямолинейном участке с распознаваемой разметкой**

Анализ экспериментальных результатов подтверждает экспоненциальную сходимость отклонения от центра полосы при использовании алгоритма дифференциального регулятора с экстраполяцией отклонения.

Ниже представлены диаграммы параметров движения на развороте при отсутствии видимой разметки (рисунок 4).



**Рисунок 4 – Временные диаграммы параметров движения на развороте при отсутствии видимой разметки**

Анализ результатов подтверждает работоспособность алгоритма одношагового регулятора угла поворота управляемых колес с компенсацией запаздывания, вносимого программами.

## Заключение

Анализ результатов проведенных исследований задачи стабилизации беспилотного транспортного средства на заданной траектории позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Формализация задачи стабилизации в терминах минимизации квадратичного функционала качества управления с учетом функциональных ограничений на технико-экономические показатели адекватна пониманию целей создания конкурентоспособных систем.

2. Сравнительный качественный анализ навигационных систем для реальных условий эксплуатации приводит к выводу о необходимости их комплексирования.

3. Для замкнутых маршрутов ограниченной длины с участками распознаваемой разметки комплексирование КНС и ВСОР дает техническое решение системы в минимальной конфигурации дополнительных технических средств и с минимальным уровнем технико-экономических показателей.

4. Разработанная двухконтурная компьютерная система управления с одношаговым регулятором курса с виртуальными датчиками скорости центра масс, угла поворота управляемых колес и дополнительной угловой скорости вращения при заносах и сносах и дифференциальным стабилизатором отклонения обеспечивает компенсацию запаздываний, вносимых программами и экспоненциальную устойчивость при конечном шаге  $\Delta T$ .

5. Результаты тестовых заездов не противоречат теоретическим исследованиям и позволяют судить об эффективности полученного решения поставленной задачи.

### **Благодарность**

Данная научная статья была подготовлена по результатам прикладного научного исследования, которое проводится при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России, Соглашение № 14.625.21.0043 Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62517X0043.

### **Литература**

1. Zwicky F. The morphological approach to discovery, invention, research and construction // *New methods of thought and procedure*. – Pasadena, 1967. – P. 273–297.

2. Noreen I., Khan A., Habib Z. Optimal Path Planning using RRT\* based Approaches: A Survey and Future Directions // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. – November 2016. – Vol. 7 (11). – P. 97–107.

3. Kiss D., Papp D. Effective Navigation in Narrow Areas: A Planning Method for Autonomous Cars // *IEEE 15th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI 2017)*. – January 2017. – DOI: 10.1109/SAMI.2017.7880346. URL: [https://www.researchgate.net/publication/313678598\\_Effective\\_Navigation\\_in\\_Narrow\\_Areas\\_A\\_Planning\\_Method\\_for\\_Autonomous\\_Cars](https://www.researchgate.net/publication/313678598_Effective_Navigation_in_Narrow_Areas_A_Planning_Method_for_Autonomous_Cars) (дата обращения: 23.07.2017)

4. Бузников С.Е. Метод построения виртуальных датчиков информации систем активной безопасности автомобиля // *Труды XVII Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем»*. – М.: РГГУ, 2009. – С. 420–424.