УДК **629.365** DOI **10.46960/1816-210X_2025_2_111**
EDN **ZXSDKB**

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО КРУИЗ-КОНТРОЛЯ И ЭКСТРЕННОГО ТОРМОЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Б.В. Падалкин
ORCID: **0009-0005-2766-6966** e-mail: **padalkin@bmstu.ru**
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

А.А. Стадухин
ORCID: **0000-0003-1414-3435** e-mail: **ant.m9@ya.ru**
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

В.С. Майер
ORCID: **0009-0007-1017-8207** e-mail: **vmayer2002@bk.ru**
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

В.Б. Холоденко
ORCID: **0000-0002-3678-608X** e-mail: **kholodenko@bmstu.ru**
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Предложен ряд алгоритмов системы управления беспилотной транспортной машины с функциями адаптивного круиз-контроля и автоматического экстренного торможения. Данная система позволяет поддерживать дистанцию до впереди идущего транспортного средства, экстренно останавливаться перед неожиданно возникающим препятствием и поддерживать заданную скорость движения. Описанный алгоритм адаптивного круиз-контроля нацелен на повышение безопасности участников дорожного движения. Преимущество автоматизированной системы управления перед оператором заключается в нивелировании человеческого фактора, а также высокой скорости реакции и точности действий. Представлена математическая модель движения беспилотной машины, предназначенная для проверки и настройки предложенной системы управления, реализующей функции адаптивного круиз-контроля. Используя данные о скорости препятствия и дистанции до препятствия, система может сформировать управляющее воздействие, необходимое для безопасного движения автомобиля, исключая вероятность столкновения. Имитационное компьютерное моделирование показывает работоспособность системы при основных сценариях использования. Приведены данные об экспериментальном исследовании оборудования, предназначенного для проверки предложенных алгоритмов на практике, а также создания полнофункциональной системы управления движением беспилотной транспортной машины.

***Ключевые слова*:** адаптивный круиз-контроль, предотвращение столкновений, система безопасности автомобиля, беспилотное вождение, система экстренного торможения.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Падалкин, Б.В. Моделирование системы адаптивного круиз-контроля и экстренного торможения беспилотного транспортного средства / Б.В. Падалкин, А.А. Стадухин, В.С. Майер, В.Б. Холоденко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 2. С. 111-124. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_111 EDN: ZXSDKB

© Падалкин Б.В., Стадухин А.А., Майер В.С., Холоденко В.Б., 2025

UNMANNED VEHICLE ADAPTIVE CRUISE CONTROL AND EMERGENCY BRAKING SYSTEM SIMULATION

B.V. Padalkin
ORCID: **0009-0005-2766-6966** e-mail: **padalkin@bmstu.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

A.A. Stadukhin
ORCID: **0000-0003-1414-3435** e-mail: **ant.m9@ya.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

V.S. Mayer
ORCID: **0009-0007-1017-8207** e-mail: **vmayer2002@bk.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

V.B. Kholodenko
ORCID: **0000-0002-3678-608X** e-mail: **kholodenko@bmstu.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. The paper proposes a number of algorithms for the control system of an unmanned vehicle with adaptive cruise control and automatic emergency braking functions. This system allows to maintain a distance from the vehicle in front, make an emergency stop in front of an unexpected obstacle and maintain a set speed. The described adaptive cruise control algorithm is aimed at improving the road safety. The advantage of the automated control system over an operator is the elimination of the human factor, as well as high reaction speed and accuracy of actions. A mathematical model of the motion of an unmanned vehicle is presented. The model is developed to test and adjust the proposed control system implementing the functions of adaptive cruise control. The system can generate the control action necessary for the safe movement of the vehicle, eliminating the possibility of a collision using data on the speed of the obstacle and the distance to the obstacle. Computer simulation shows the system's performance under basic scenarios. Data on the experimental study of equipment designed to test the proposed algorithms in practice, as well as the results of development a fully functional control system for the movement of an unmanned vehicle are provided.

Key words: adaptive cruise control, collision prevention, vehicle security system, unmanned driving, emergency braking system.

FOR CITATION: B.V. Padalkin, A.A. Stadukhin, V.S. Mayer, V.B. Kholodenko. Unmanned vehicle adaptive cruise control and emergency braking system simulation. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 2. Pp. 111-124. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_111 EDN: ZXSDKB

Введение

Существующие системы адаптивного круиз-контроля и экстренного торможения (ККЭТ) уже находят свое применение в серийных автомобилях и других технических системах. С каждым поколением автомобилей они становятся все более совершенными, поэтому исследования в данном направлении по-прежнему актуальны, особенно в контексте охраны интеллектуальной собственности разработчиков автомобилей и создания подобных отечественных систем (т.е. импортозамещения). Кроме того, ККЭТ являются необходимыми для безопасного функционирования беспилотных транспортных средств (БТС), главное требование к движению которых – безопасность. Использование алгоритмов ККЭТ в системе управления БТС может уменьшить нагрузку на его оператора и снизить опасность для окружающих людей и машин. Типичные задачи беспилотного движения – следование за машиной-

лидером или по обозначенной траектории. С этой целью на автомобиль устанавливаются различные устройства технического зрения, способные распознать дорогу, машины и объекты, а также определить расстояние до различных преград. Применение технического зрения в автомобилях и беспилотных платформах является одним из наиболее исследуемых направлений для транспортной отрасли. В контексте данной статьи наиболее интересны следующие исследования.

В работе [1] приведено описание системы помощи водителю, сформулированы основные проблемы и задачи, связанные с анализом дорожной обстановки, при этом не исследуется случай экстренной остановки перед неожиданно возникающим препятствием. Работа [2] посвящена проблеме разработки алгоритма функционирования адаптивного круиз-контроля, работающего в условиях, меняющихся в широких пределах передаточного отношения трансмиссии и скорости движения грузового автомобиля. Работа [3] содержит исследование эффективности системы управления беспилотным транспортным средством. В работе [4] приведена методика по подбору коэффициентов ПИД регулятора для системы обычного (не адаптивного) круиз-контроля.

В данной статье предлагается рассмотреть вопросы разработки системы ККЭТ БТС, обладающей следующей функциональностью:

- поддержание заданной оператором скорости;
- поддержание скорости машины-лидера с учетом соблюдения безопасной дистанции;
- выполнение экстренной остановки в случае внезапного возникновения препятствия.

Имитационная модель динамики автомобиля как объекта управления

С целью отработки алгоритмов управления торможением и адаптивного круиз-контроля была разработана имитационная компьютерная модель прямолинейного движения БТС, структурная схема которой представлена на рис. 1. Прямолинейное движение корпуса машины моделируется с использованием дифференциального уравнения (1). При этом считается, что на корпус действуют только сила воздушного сопротивления P_{wx} и силы продольной реакции опоры R_{xi}, i-й оси.

В расчете динамики корпуса ускорение машины $\ddot{x}$ рассчитывается исходя из силы воздушного сопротивления P_{wx} и сил продольной реакции опоры R_{xi}, i-й оси (1):

$$m \cdot \ddot{x} = \sum_{i=1}^{2} R_{xi} - P_{wx} \quad (1)$$

где m – масса БТС, кг; R_{xi} – сила продольной реакции опоры i-й оси, Н; P_{wx} – сила воздушного сопротивления, Н; $\ddot{x}$ – ускорение автомобиля, м/с^2.

В дальнейшем используется обозначение a_x.

Сила воздушного сопротивления P_{wx} пропорциональна квадрату скорости машины V_x (2):

$$P_{wx} = 0.5 \cdot V_x^2 \cdot c_x \cdot F_l \cdot \rho_v \quad (2)$$

где c_x – аэродинамический коэффициент машины; F_l – площадь лобового сечения, м^2; ρ_v – плотность воздуха, кг/м^3; V_x – скорость машины, м/с.

Нормальные составляющие реакции опоры R_{z1} и R_{z2}, действующие на колеса, рассчитывается исходя из суммы сил и моментов (3):

$$\begin{cases} R_{z1} = G - R_{z2} \\ R_{z2} = a_x \cdot m \cdot h_c + P_{wx} \cdot h_c + f \cdot G \cdot r_{k0} + G \cdot L \end{cases}, \quad (3)$$

где R_{z1} и R_{z2} – нормальные реакции опоры, действующие на оси, Н; L – колесная база БТС, м; G – вес БТС, Н; h_c – высота центра масс БТС, м; f – коэффициент сопротивления качению колеса; r_{k0} – свободный радиус колеса, м.

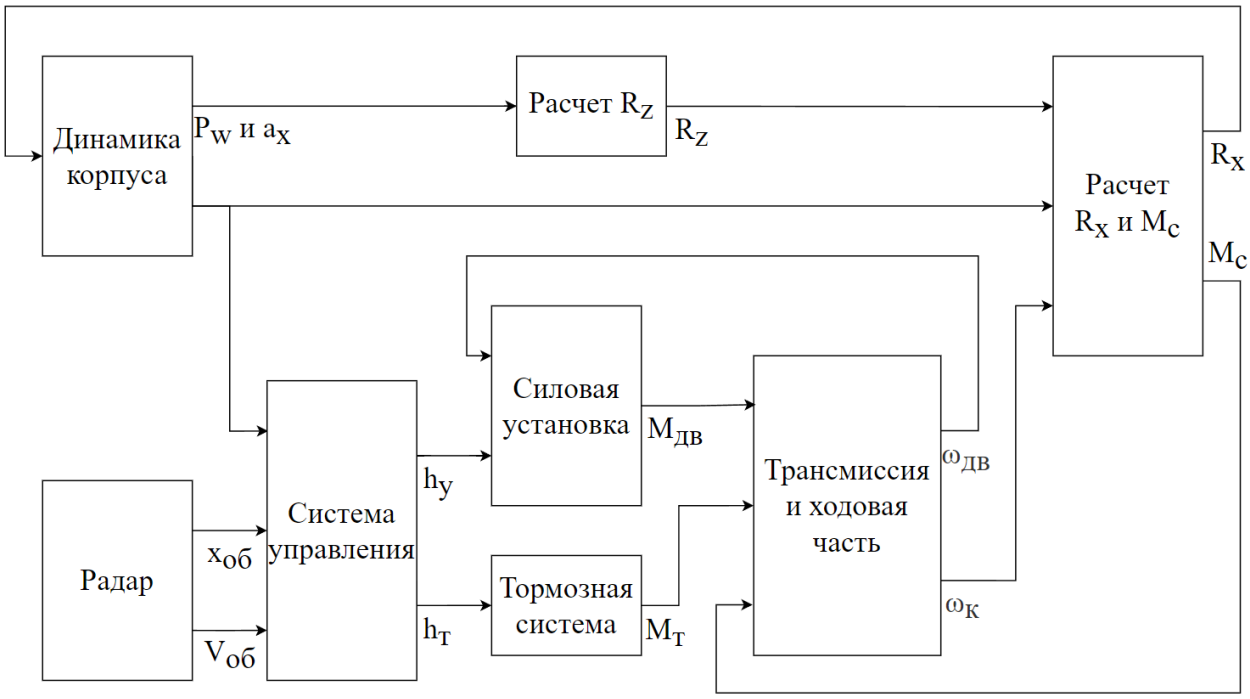

Рис. 1. Структурная схема имитационной модели автомобиля:
$h_у$ и $h_т$ – коэффициенты использования двигателя и тормозной системы;
$M_{дв}$ и $M_т$ – моменты, получаемый от двигателя и тормозной системы;
$M_с$ – момент сопротивления прямолинейному движению; R_z и R_x – нормальная и продольная реакции опоры, действующие на колесо; P_w – сила воздушного сопротивления;
V_x и a_x – линейная скорость и ускорение автомобиля; $x_{об}$ и $V_{об}$ – расстояние до препятствия и скорость препятствия; $w_{дв}$ и $w_к$ – угловая скорость ротора двигателя и колеса

Fig. 1. Structural diagram of the vehicle simulation model:
h_y and h_m – engine and brake system utilization rates; $M_{дв}$ and M_m – moments obtained from the engine and braking system; M_c – moment of resistance to rectilinear motion; R_z and R_x – normal and longitudinal support reactions acting on the wheel; P_w – air resistance force;
V_x and a_x – linear velocity and acceleration of the vehicle; $x_{об}$ and $V_{об}$ – distance to the obstacle and speed of the obstacle; $w_{дв}$ and $w_к$ – angular velocity of the engine rotor and wheel

Расчетная схема автомобиля представлена на рис. 2.

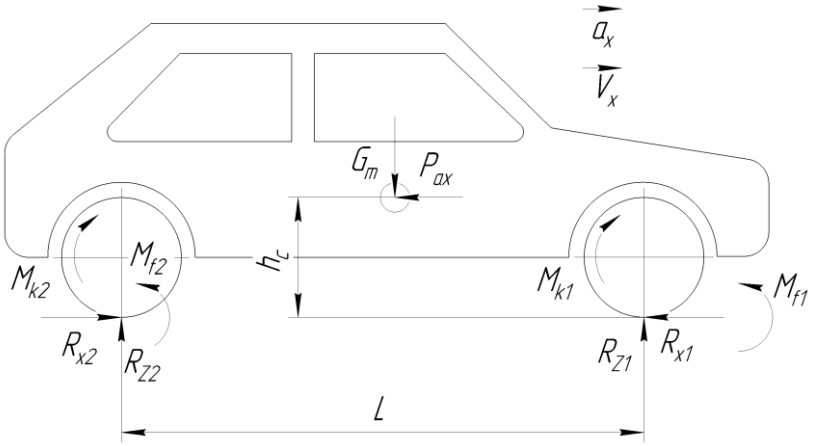

Рис. 2. Расчетная схема автомобиля для предложенной модели движения

Fig. 2. Computational scheme of the vehicle for the proposed model of movement

Продольную составляющую реакции опоры R_{xi} , i-й оси, действующей на колеса, можно определить с помощью выражения (4):

$$R_{xi} = \mu_{si} \cdot R_{zi} \tag{4}$$

где μ_{si} – коэффициент взаимодействия колеса с опорным основанием для i-й оси; R_{zi} – сила нормальной реакции опоры i-й оси, Н.

Коэффициент взаимодействия колеса с опорным основанием μ_{si}, i-й оси считается по следующей формуле (5):

$$\mu_{si} = \mu_{smax} \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_{ki}}{S_0}}\right) \cdot \left(1 + e^{\frac{S_{ki}}{S_1}}\right) \tag{5}$$

где μ_{smax} – коэффициент взаимодействия колеса с опорным основанием при полном контакте; S_{ki} – коэффициент скольжения i-й оси; S_0 и S_1 – константы.

Коэффициент скольжения S_{ki}, i-й оси, рассчитывается, исходя из режима движения колеса (6):

$$S_{ki} = \frac{V_{\text{ск}i}}{\max(\omega_{\text{к}i} \cdot r_{k0}, V_x)} \tag{6}$$

где $V_{\text{ск}i}$ – скорость скольжения i-й оси, м/с; $\omega_{\text{к}i}$ – скорость вращения i-й оси, 1/с.

Момент сопротивления движению $M_{\text{с}i}$, i-й оси, и качению M_f, i-й оси, вычисляются с использованием формул (7 и 8):

$$M_{\text{с}i} = M_{fi} + r_{k0} \cdot R_{xi} \tag{7}$$

$$M_{fi} = r_{k0} \cdot f \cdot R_{zi} \tag{8}$$

M_{ci} – момент сопротивления движению i-й оси, Н·м; M_{fi} – момент сопротивления качению i-й оси, Н·м.

Для простоты силовую установку автомобиля в данной работе предлагается представить в виде источника постоянной механической мощности, с ограничением на максимальный крутящий момент (9):

$$\begin{cases} M_{\text{д}} = M_{\text{д}max} \cdot h_{\text{у}}, 0 \le \omega_{\text{д}} < \frac{N_{\text{д}}}{M_{\text{д}max}} \\ M_{\text{д}} = \frac{N_{\text{д}}}{\omega_{\text{д}}} \cdot h_{\text{у}}, \frac{N_{\text{д}}}{M_{\text{д}max}} \le \omega_{\text{д}} < \omega_{\text{д}\boldsymbol{max}} \end{cases} \tag{9}$$

где $N_{\text{д}}$ – мощность двигателя, Вт; $M_{\text{д}}$ – момент двигателя, Н·м; $\omega_{\text{д}}$ – угловая скорость двигателя, 1/с; $M_{\text{д}max}$ – максимальный момент двигателя, Н·м; $\omega_{\text{д}max}$ – максимальная скорость вращения двигателя, 1/с; $h_{\text{у}}$ – степень использования двигателя, меняется в диапазоне 0…1.

Тормозная система также моделируется упрощенно, в соответствии с уравнением (10):

$$M_{\text{т}} = h_{\text{т}} \cdot M_{\text{т}max} \tag{10}$$

где $M_{\text{т}max}$ – максимальный момент тормозной системы, Н·м; $h_{\text{т}}$ – степень использования тормозной системы, меняется в диапазоне 0…1.

Трансмиссия моделируется, исходя из системы уравнений (11), для определенности машина считается заднеприводной:

$$\begin{cases} J_1 \cdot \dot{\omega}_{\text{к}1} = -M_{\text{т}} - M_{\text{с}1} \\ J_2 \cdot \dot{\omega}_{\text{к}2} = u_{\text{т}} \cdot M_{\text{д}} - M_{\text{т}} - M_{\text{с}2} \end{cases} \tag{11}$$

где J_1 и J_2 – приведенные к ведомому и ведущему колесам моменты инерции, кг·м; $\dot{\omega}_{\text{к}1}$ и $\dot{\omega}_{\text{к}2}$ – угловые ускорения ведомой и ведущей осей, 1/с^2.

Приведенные к ведомому и ведущему колесам моменты инерции считаются по следующим формулам (12 и 13):

$$J_1 = 2 \cdot J_k \tag{12}$$

$$J_2 = u_{\text{т}}^2 \cdot J_{\text{д}} + 2 \cdot J_k \tag{13}$$

где $J_{\text{к}}$ – моменты инерции каждого колеса, кг·м; $J_{\text{д}}$ – моменты инерции двигателя, кг·м; $u_{\text{т}}$ – передаточное число трансмиссии.

Передаточное число трансмиссии можно определить с помощью выражения (14):

$$\omega_{\text{д}} = \frac{\omega_{\text{к2}}}{u_{\text{т}}} \tag{14}$$

$\omega_{\text{к2}}$ – угловая скорость ведущего колеса, 1/с.

Математическая модель работы технического зрения БТС (автомобильного микроволнового радара) представлена системой управлений (15). Исходя из условий эксперимента, выбирается $V_{\text{о}}$ – начальная скорость, $t_{\text{соб}}$ – время начала эксперимента, Δx_0 – дистанция до препятствия в момент времени$t_{\text{соб}}$. До момента времени $t_{\text{соб}}$ препятствие находится вне зоны видимости радара, исходя из чего система управления его не учитывает и находится в состоянии обычного круиз контроля. По наступлению $t_{\text{соб}}$ система переходит в состояние адаптивного круиз-контроля, принудительного или экстренного торможения.

$$\begin{cases} x_{\text{о}} = x + 200, t \le t_{\text{соб}} \\ x_{\text{о}} = x + \Delta x_0 + V_{\text{о}} \cdot (t - t_{\text{соб}}), t \ge t_{\text{соб}} \end{cases} \tag{15}$$

где $x_{\text{о}}$ – координата препятствия в абсолютной системе координат, м; Δx_0 – дистанция до препятствия в момент времени $t_{\text{соб}}$, м; $V_{\text{о}}$ – скорость препятствия, м/с; x – координата БТС в абсолютной системе координат, м; t – текущее время моделирования, с.

Структура системы управления адаптивного круиз-контроля и экстренного торможения

Предлагаемая система ККЭТ задает воздействие на педаль газа или тормоза, исходя из пути, необходимого для остановки машины, а также значений сигналов пропорционально-дифференциального регулятора адаптивного круиз-контроля и пропорционального регулятора обычного круиз-контроля (рис. 3).

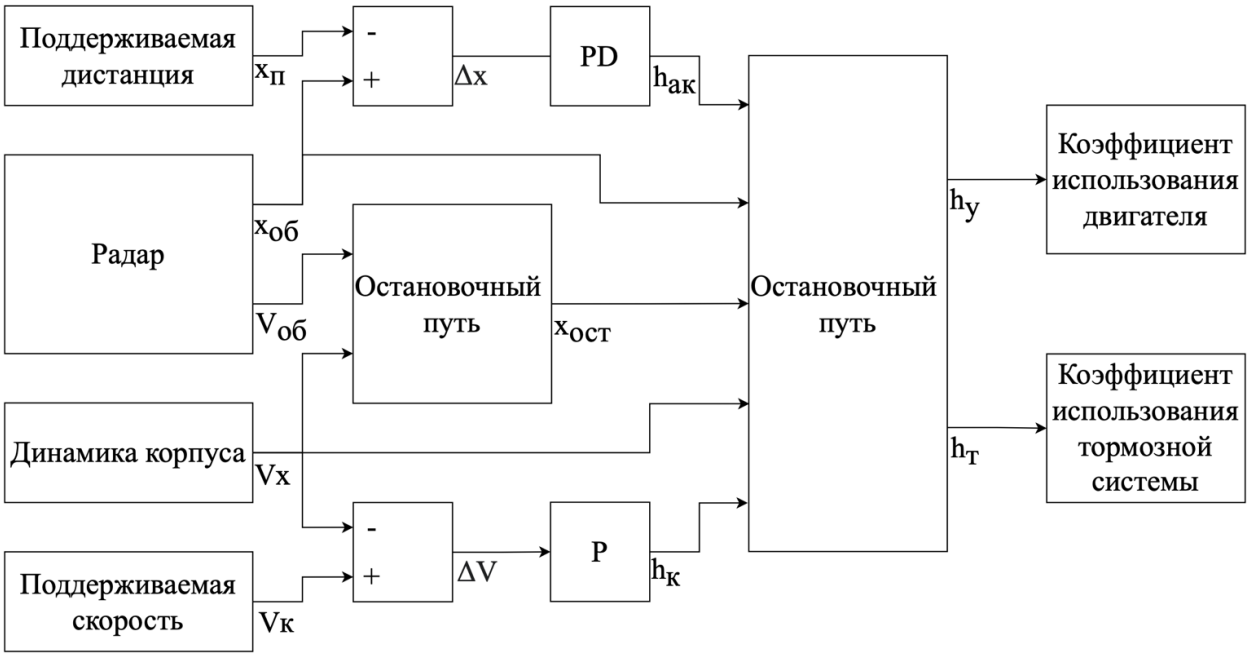

Рис. 3. Система управления торможением и ускорением:
$\boldsymbol{h}_{\text{ак}}$ и $\boldsymbol{h}_{\text{к}}$ – управляющие воздействия адаптивного и обычного круиз-контролей;
$\boldsymbol{V_k}$ – заданная величина скорости для круиз-контроля; $\boldsymbol{x}_{\text{к}}$ – заданная дистанция для адаптивного круиз-контроля; $\Delta\boldsymbol{V}$ и $\Delta\boldsymbol{x}$ – ошибки скорости и расстояния; $\boldsymbol{x}_{\text{ост}}$ – необходимый для остановки путь

Fig. 3. Braking and acceleration control system:
$\boldsymbol{h}_{ак}$ and $\boldsymbol{h}_{к}$ – control actions of adaptive and conventional cruise controls;
$\boldsymbol{V}_{к}$ – set speed value for cruise control; $\boldsymbol{x}_{к}$ – set distance for adaptive cruise control;
$\Delta\boldsymbol{V}$ and $\Delta\boldsymbol{x}$ – speed and distance errors; $\boldsymbol{x}_{ост}$ – distance required to stop

Исходя из данных, полученных с радара, можно рассчитать дистанцию необходимую для остановки (16):

$$x_{\text{ост}} = \frac{(V_x - V_{\text{о}})^2}{2 \cdot a_{\text{т}}}, \tag{16}$$

где $a_{\text{т}}$ – максимальное замедление транспортного средства, м·с^2.

Замедление транспортного средства при торможении можно вычислить по формуле (17):

$$a_{\text{т}} = \text{g} \cdot \mu_{100}, \tag{17}$$

где μ_{100} – коэффициент сцепления при 100 процентном буксовании; g = 9,81 – ускорение свободного падения, м/с^2.

Необходимую дистанцию между машиной и препятствием необходимо определить по формуле (18):

$$x_{\text{п}} = V_x \cdot 2, \tag{18}$$

Система управления имеет два регулятора: пропорциональный принимает на вход разность между заданной и текущей скоростями и необходим для поддержания скорости, пропорционально-дифференциальный – принимает на вход дистанцию до объекта; пропорциональная составляющая отвечает за сближение машины и препятствия, дифференциальная составляющая отвечает за поддержание БТС скорости, равной скорости движущегося впереди объекта. Алгоритм адаптивного круиз-контроля имеет четыре состояния (рис. 4).

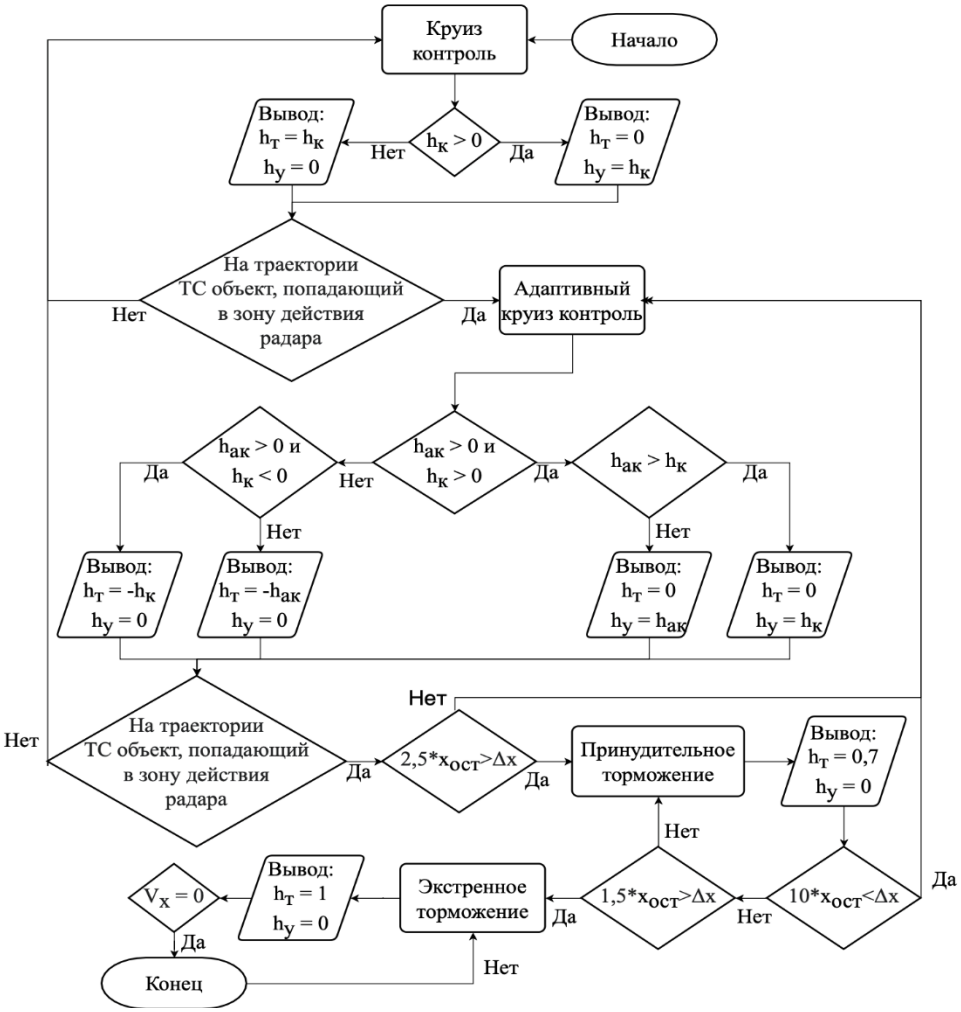

Рис. 4. Алгоритм системы управления

Fig. 4. Control system algorithm

Состояние «Круиз-контроль» необходимо для поддержания заданной скорости в то время, когда впереди транспортного средства отсутствует препятствие. Если оно появляется в области действия радара, система переходит в состояние «Адаптивный круиз-контроль». Данное состояние необходимо для следования за препятствием. Для избегания превышения скорости значения пропорционального и пропорционально-дифференциального регуляторов сравниваются между собой. Если дистанция до препятствия меньше, чем 2,5 расчетные дистанции торможения, система переходит в состояние «Принудительное торможение», которое происходит, пока дистанция до препятствия не станет больше, чем 10 расчетных дистанций торможения. Если дистанция до препятствия становится меньше, чем 1,5 расчетные дистанции торможения, система переходит в состояние «Экстренное торможение» и происходит принудительное торможение до полной остановки. Из этого состояния система не может выйти без участия оператора.

Указанные настройки системы управления (временные интервалы и дистанции торможения) выбраны на основе опыта работы с представленной здесь моделью. В реальных условиях настройки следует выбирать исходя из динамики транспортной машины и комфорта участников движения.

Описание вычислительных экспериментов

Были исследованы четыре основные ситуации: остановка перед неожиданно возникающим неподвижным препятствием, преследование неожиданно возникающего неподвижного препятствия, остановка перед неподвижным препятствием, преследование подвижного препятствия. Основные численные параметры эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Основные численные параметры эксперимента

Table 1.
Main numerical parameters of the experiment

Значения PD регулятора адаптивного круиз-контроля	P = 0,03 D = 0,2
Значения P регулятора обычного круиз-контроля	P = 1
Полная масса машины, кг	500
Высота центра масс, м	0,3
Габаритная высота машины, м	1,2
Габаритная ширина машины, м	1,6

По условиям первого эксперимента БТС начинает ускоряться, пока не достигнет скорости 60 км/ч. На 15-й секунде на расстоянии 30 м неожиданно появляется неподвижное препятствие (рис. 5).

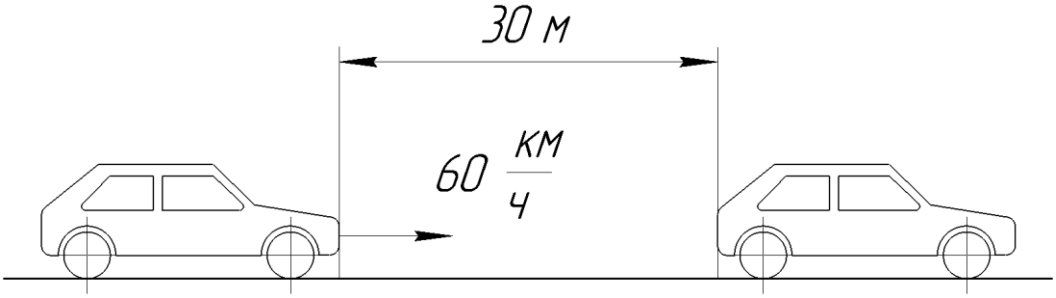

Рис. 5. Методика первого эксперимента

Fig. 5. Methodology of the first experiment

Поскольку дистанция до препятствия меньше, чем 1,5 расчетные дистанции торможения, система переходит в состояние «Экстренное торможение» и тормозит до полной остановки (рис. 6).

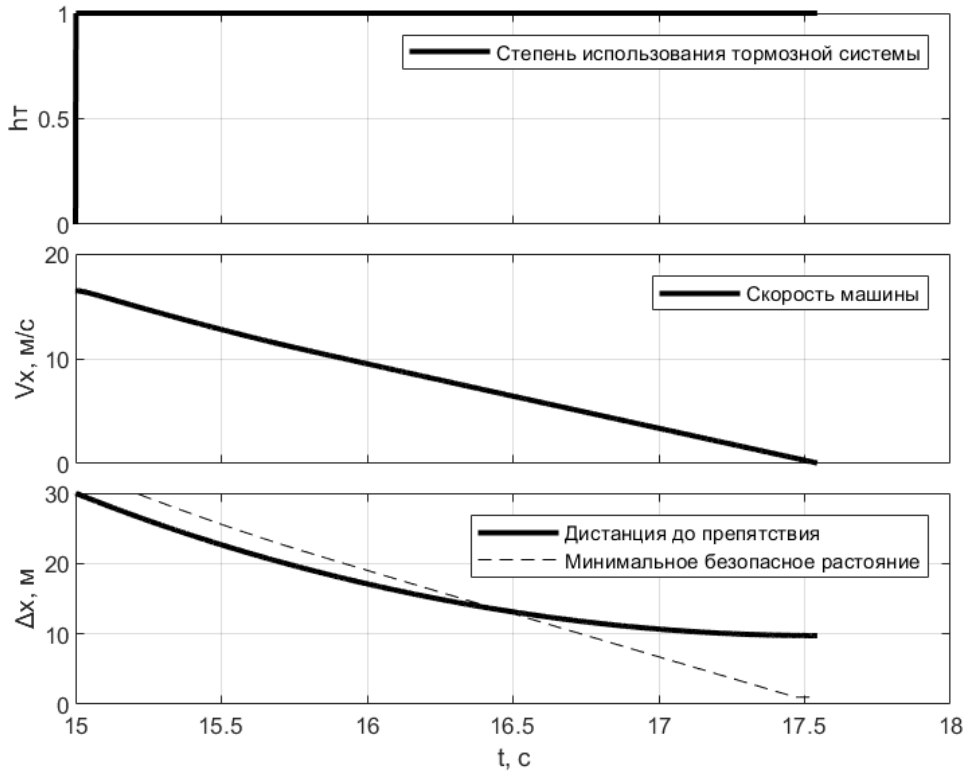

Рис. 6. Управляющее воздействие, скорость и дистанция до препятствия

Fig. 6. Control action, speed and distance to obstacle

По результатам первого эксперимента можно сказать, что транспортное средство незамедлительно перешло в состояние «Экстренное торможение» до полной остановки, что в выбранных условиях эксперимента позволило избежать столкновения. По условиям второго эксперимента на скорости 60 км/ч на расстоянии 30 м неожиданно появляется подвижное препятствие, движущееся в попутном направлении со скоростью 10 км/ч (рис. 7).

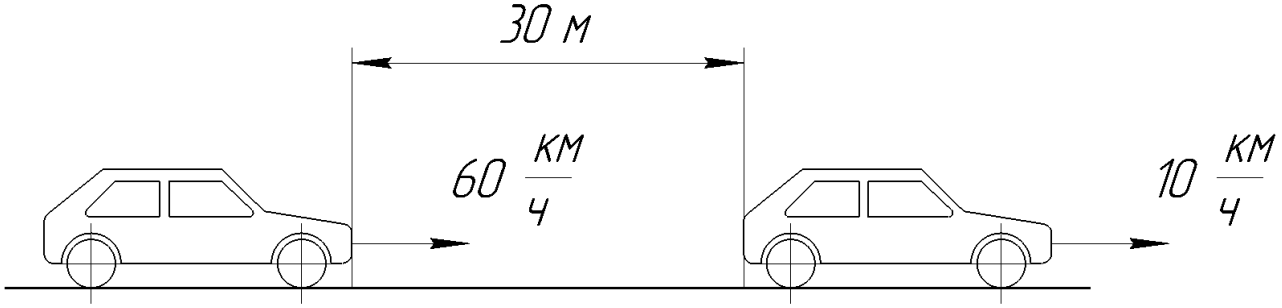

Рис. 7. Методика второго эксперимента

Fig. 7. Methodology of the second experiment

Так как дистанция до препятствия меньше, чем 2,5 расчетные дистанции, но больше, чем 1,5 расчетные дистанции, система переходит в состояние «Экстренное торможение» и тормозит, пока дистанция до препятствия не станет больше, чем 10 расчетных дистанций торможения. После этого система переходит в состояние «Адаптивный круиз-контроль» и начинает сближение с препятствием, пока не окажется на расстоянии 3 м (рис. 8).

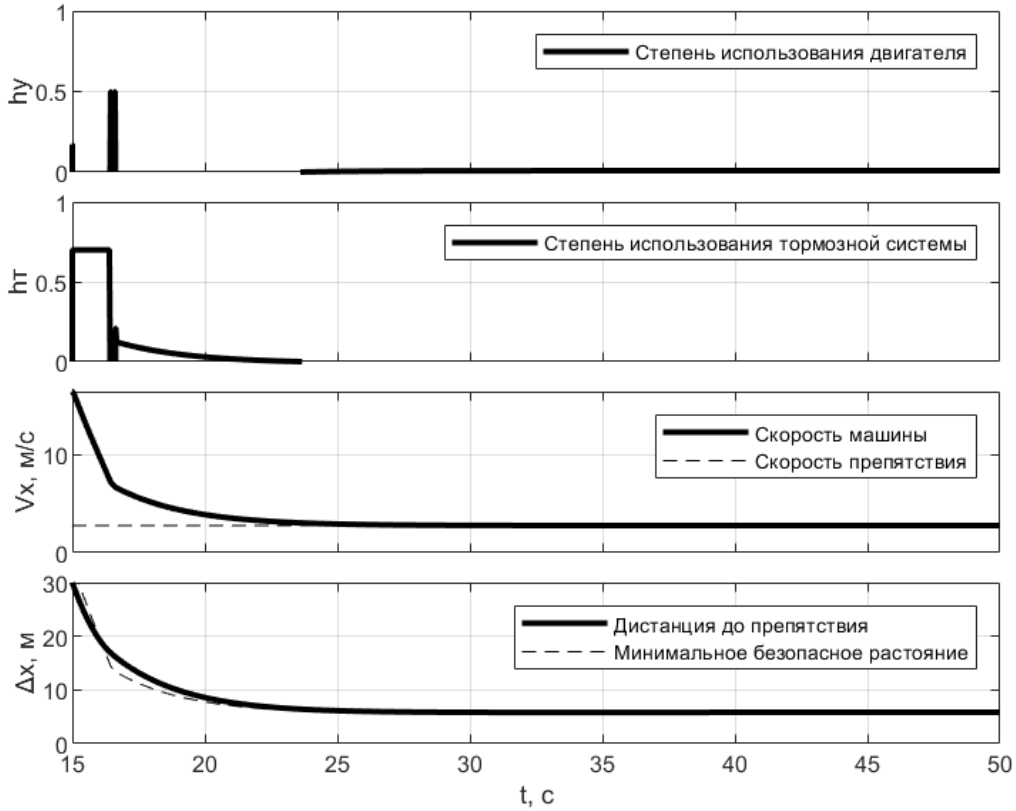

Рис. 8. Степень использования двигателя и тормозной системы, скорость и дистанция до препятствия

Fig. 8. Engine and brake system usage, speed and distance to obstacle

По результатам второго эксперимента можно сказать, что ТС незамедлительно переходит в состояние «Принудительное торможение» до момента, пока скорости БТС и препятствия не сравняются, что позволяет избежать столкновения. После этого система управления сократила дистанцию в режиме «Адаптивный круиз-контроль». В процессе эксперимента не было обнаружено перерегулирования или иного процесса негативного характера, способного повлечь аварийную ситуацию. По условиям третьего эксперимента на скорости 60 км/ч на расстоянии 180 м появляется неподвижное препятствие (рис. 9).

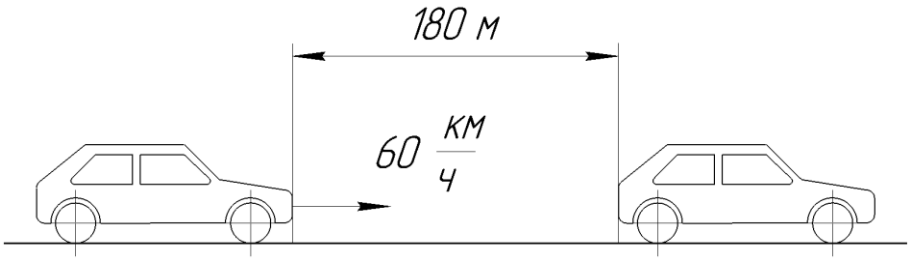

Рис. 9. Методика третьего эксперимента

Fig. 9. Methodology of the third experiment

Поскольку расстояние до препятствия больше, чем 2,5 расчетные дистанции, система переходит в состояние адаптивного круиз-контроля. Управляющее воздействие пропорционально-дифференциального регулятора больше, чем пропорционального регулятора, поэтому система еще 4 сек движется с максимально разрешенной скоростью, после чего начинает

ее плавно снижать вплоть до полной остановки. Система узнала о препятствии заблаговременно, и перехода в экстренные состояния удалось избежать (рис. 10).

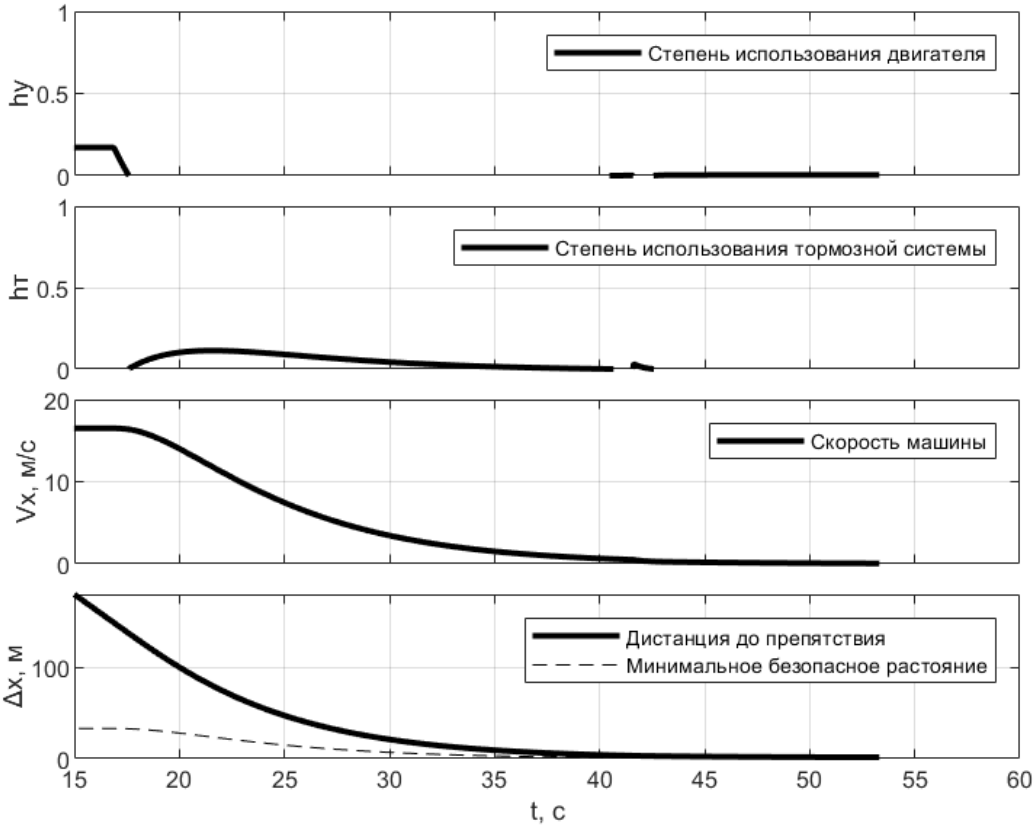

Рис. 10. Степень использования двигателя и тормозной системы, скорость и дистанция до препятствия

Fig. 10. Engine and brake system usage, speed and distance to obstacle

По результатам третьего эксперимента можно сказать, что транспортное средство, не переходя в экстренные режимы, сократило дистанцию, после чего снизило скорость вплоть до полной остановки. В процессе эксперимента не было обнаружено перерегулирования или циклического процесса потенциально способных повлечь аварийную ситуацию.

По условиям четвертого эксперимента на скорости 60 км/ч на расстоянии 180 м появляется подвижное препятствие со скоростью 55 км/ч (рис. 11).

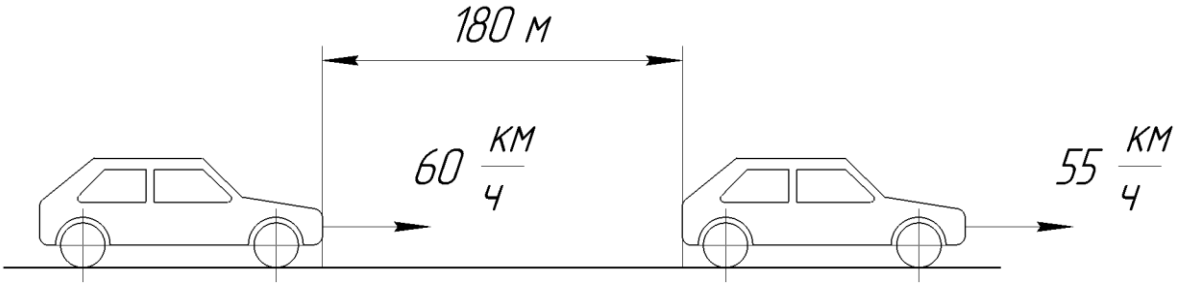

Рис. 11. Методика четвертого эксперимента

Fig. 11. Methodology of the fourth experiment

Поскольку расстояние до препятствия больше, чем 2,5 расчетные дистанции, система переходит в состояние адаптивного круиз-контроля. Управляющее воздействие пропорцио-

нально-дифференциального регулятора больше, чем пропорционального регулятора, поэтому БТС до 150 сек движется с максимально разрешенной скоростью, после чего, избегая торможения, начинает ее плавно снижать до скорости движущегося впереди объекта (рис. 12).

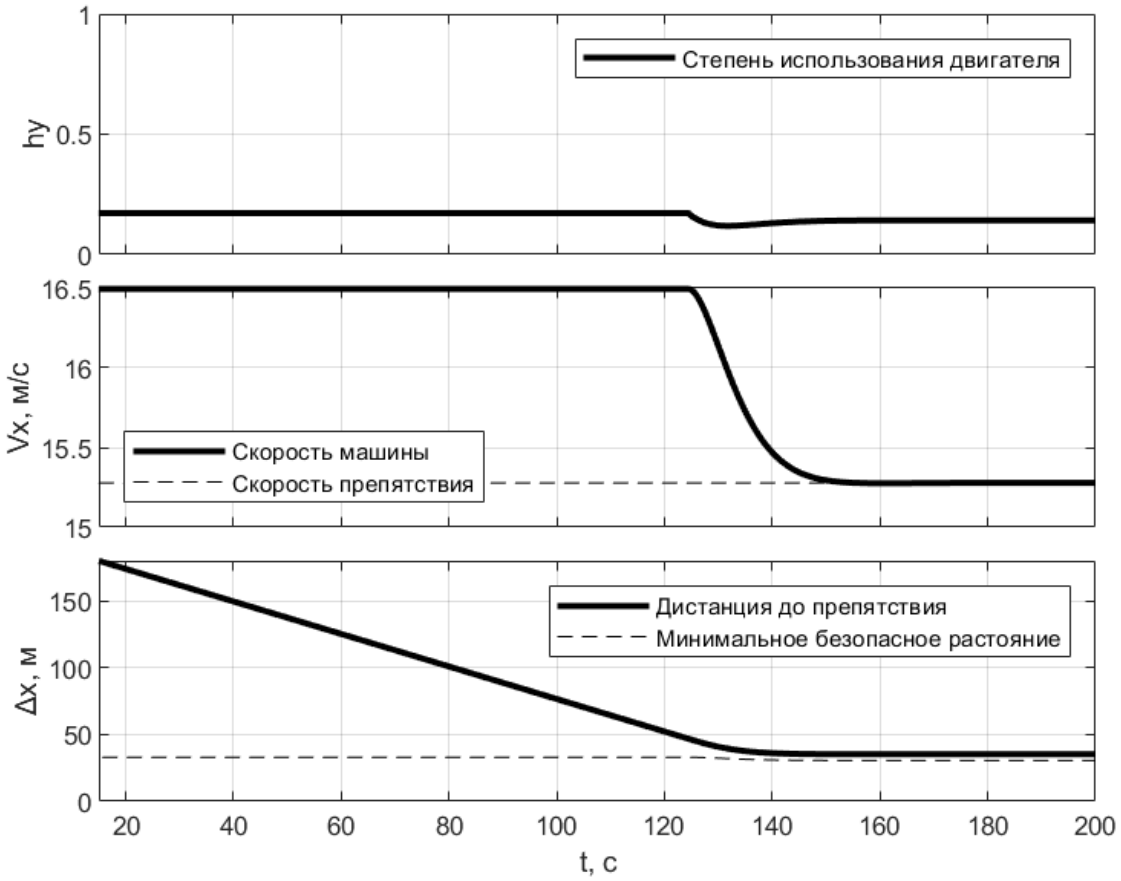

Рис. 12. Степень использования двигателя и тормозной системы, скорость и дистанция до препятствия

Fig. 12. Engine and brake system usage, speed and distance to obstacle

По результатам четвертого эксперимента можно сказать, что БТС, не переходя в экстренные режимы, сократило дистанцию, после чего снизило скорость вплоть до скорости препятствия.

Предварительные натурные эксперименты и заключение

С целью подготовки к полноценному натурному испытанию предложенной системы ККЭТ были проведены исследования на специальном стенде (рис. 13). Он состоял из микроволнового радара MR-76 [5], питаемого от отдельного аккумулятора и подключенного к ЭВМ с помощью преобразователя интерфейсов CAN-USB. ЭВМ содержала специальное программное обеспечение, способное получать сигналы от радара и преобразовывать их в декартовы координаты, связанные с радаром. В качестве объектов наблюдения (т.е. «препятствий») выступали люди, которые совершали перемещение по заданным на рис. 13 траекториям с различной скоростью.

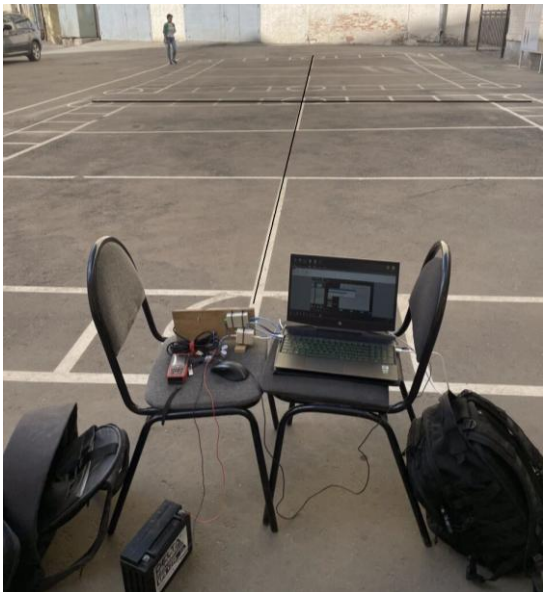

Рис. 13. Схема эксперимента:
1 – испытательная установка в составе ЭВМ, микроволнового радара и преобразователя интерфейсов; 2 – траектория перемещения регистрируемых объектов

Fig. 13. Scheme of the experiment:
1 – test setup consisting of a computer, microwave radar and interface converter; 2 – trajectory of movement of registered objects

Результаты обработки данных, зарегистрированных радаром в процессе эксперимента, представлены на графике (рис. 14).

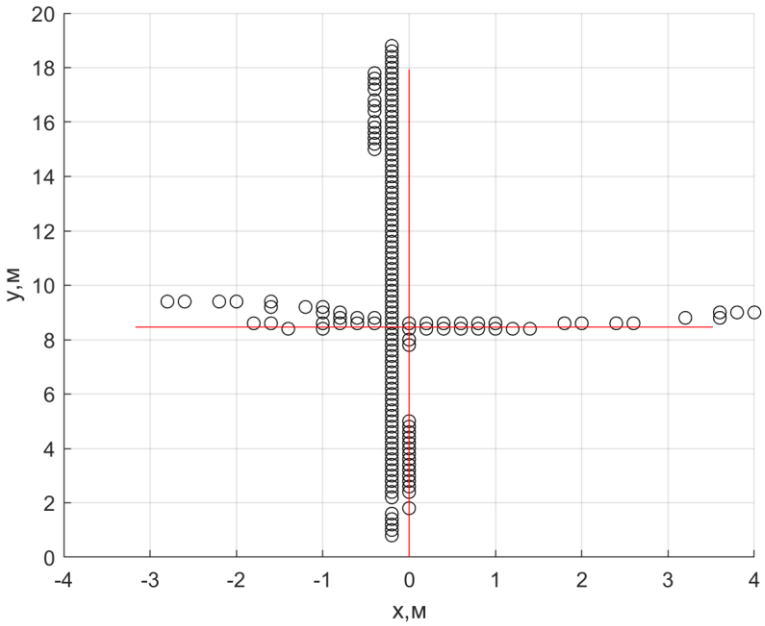

Рис. 14. Сравнение заданных траекторий объектов и траекторий, полученных с помощью стенда:
1 – заданная траектория объектов, 2 – зарегистрированная стендом траектория объектов

Fig. 14. Comparison of the given trajectories of objects and the trajectories obtained in the experiment:
1 – given trajectory of objects, 2 – registered trajectory of objects

Полученные в результате натурного и вычислительных экспериментов данные позволяют судить о возможности создания на основе представленной аппаратной части и разработанного алгоритма эффективной системы ККЭТ. Данную систему предполагается использовать для увеличения безопасности испытаний макетных образцов транспортных машин, а также для отработки технологии автоматического движения транспортной машины за машиной-лидером.

Библиографический список

1. **Зайцев, Э.М.** Разработка системы адаптивного круиз-контроля // Наука без границ. 2020. Вып. 3. С. 68-75.
2. **Волков, В.Г.** Синтез и нейросетевая реализация ПИ регулятора адаптивного круиз-контроля грузового автомобиля / В.Г. Волков, Д.Н. Демьянов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Вып. 11. С. 707-713.
3. **Ho Lee J.,** K. Yeom. Efficient self-driving control for lead vehicle following in a mixed traffic environment. Energy Reports. 2023. Vol. 9. November.
4. **Turan, A.** PID controller design with a new method based on proportional gain for cruise control system. Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 2024. Vol. 17, March.
5. AEB/ACC Radar MR76 [Электронный ресурс] URL: http://en.nanoradar.cn/Article/detail/id/285.html (дата обращения: 20.10.2024).

Дата поступления в редакцию: 04.12.2024

Дата принятия к публикации: 06.03.2025