

УДК 629.3

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_115

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

А.А. Стадухин

ORCID: 0000-0003-1414-3435 e-mail: ant.m@bmstu.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***В.Б. Холоденко**

ORCID: 0000-0003-1414-3435 e-mail: kholodenko@bmstu.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***Н.А. Мокрецов**

ORCID: 0000-0002-7050-1914 e-mail: mokretsovna@student.bmstu.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Рассматривается обеспечение управляемого движения гусеничной машины путем прогнозирования возникновения заноса и его предотвращения. Предлагается система помощи водителю в повороте, основанная на анализе критерия управляемого движения и способная воздействовать на органы управления трансмиссией гусеничной машины. В качестве возможных критериев управляемого движения были рассмотрены отношение теоретической и фактической скоростей поворота корпуса, а также угол увода машины. Проведен вычислительный эксперимент по оценке управляемости гусеничной машины при повороте в различных дорожных условиях. Представлены результаты моделирования движения гусеничной машины, оснащенной системой помощи водителю в повороте, а также выводы о возможности создания действующей системы помощи водителю на практике.

Ключевые слова: гусеничная машина, поворот, занос, система помощи водителю.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Стадухин, А.А. Метод определения границ управляемого движения гусеничной машины / А.А. Стадухин, В.Б. Холоденко, Н.А. Мокрецов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. №2. С. 115-126. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_115

METHOD FOR DETERMINING THE BOUNDARIES OF CONTROLLED MOVEMENT OF A TRACKED VEHICLE

A.A. Stadukhin

ORCID: 0000-0003-1414-3435 e-mail: ant.m@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
*Moscow, Russia***V.B. Kholodenko**

ORCID: 0000-0003-1414-3435 e-mail: kholodenko@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
*Moscow, Russia***N.A. Mokretsov**

ORCID: 0000-0002-7050-1914 e-mail: mokretsovna@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. Provision of controlled movement of a tracked vehicle by predicting the occurrence of skidding and its prevention, is considered. System of assistance to a driver in turning is proposed, based on the analysis of the criterion of controlled movement and capable of influencing the transmission controls of a tracked vehicle. Ratio of theoretical and actual hull turning rates, as well as drift angle of the machine, were considered as possible criteria for controlled movement. Computational experiment was carried out to assess the controllability of a tracked vehicle when turning in various road conditions. Results of modeling of movement of a tracked vehicle equipped with a system of assistance to driver in turning are presented, as well as conclusions about the possibility of creation of effective driver assistance system in practice.

Key words: tracked vehicle, turn, skidding, driver assistance system.

FOR CITATION: A.A. Stadukhin, V.B. Kholodenko, N.A. Mokretsov. Method for determining the boundaries of controlled movement of a tracked vehicle. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №2. Pp. 115-126. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_115

Введение

Высокие требования к подвижности современных гусеничных машин (ГМ) делают необходимым движение в режимах, близких к предельным по управляемости. Для безопасного и сравнительно комфортного движения в данных условиях необходимы системы помощи водителю. Они давно применяются на серийных колесных машинах, однако продолжают совершенствоваться и изучаться [1, 2]. Следование пилотируемых машин по заданному маршруту обеспечивается водителем, который имеет достаточную информацию об условиях движения и способен воздействовать на органы управления тягой, торможением и кривизной траектории ГМ. В случае дефицита информации об условиях движения (например, скользком участке дороги), невнимательности или низкой квалификации водителя, ГМ может сойти с желаемой траектории, возможно, с тяжелыми последствиями.

В настоящей работе предлагается подход к созданию системы помощи водителю в повороте, которая способна:

- определять граничные условия управляемого движения ГМ (при этом следует считать характеристики опорной поверхности неизвестными и по возможности обходиться без сложной измерительной аппаратуры на машине);
- изменять сигналы органов управления таким образом, чтобы не допустить неуправляемого движения ГМ (при этом не следует значительно менять тягу или скорость машины в повороте, так как это может усугубить развитие заноса) [3].

Очевидно, что эффективность данной системы в большой степени определяется надежностью и точностью определения граничных условий управляемого движения ГМ.

Граничные условия управляемого движения гусеничной машины

В классической теории движения ГМ существует определение критической по заносу скорости, которая вычисляется [4, 5]:

$$V_{кр1} = \sqrt{\mu \cdot g \cdot R_f},$$

где R_f – фактический радиус поворота, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; μ – коэффициент сцепления траков с грунтом; определяется по формуле Никитина:

$$\mu = \frac{\mu_{max}}{0,925 + 0,15 \frac{R_t}{B}}$$

где μ_{max} – максимальный коэффициент сцепления траков гусениц с грунтом; R_t – теоретический радиус поворота, м; B – колея машины, м.

В работе [6] также приводится формула определения критической скорости:

$$V_{кр} = \sqrt{\mu_{max} \cdot g \cdot R_f}.$$

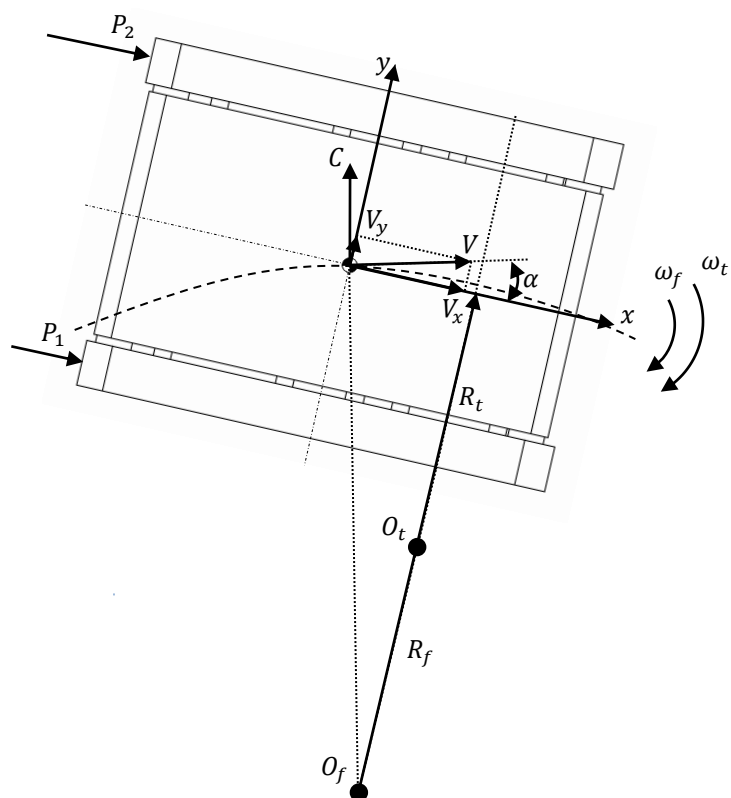


Рис. 1. Схема управляемого заноса гусеничной машины

Fig. 1. Scheme of controlled skidding of a tracked vehicle

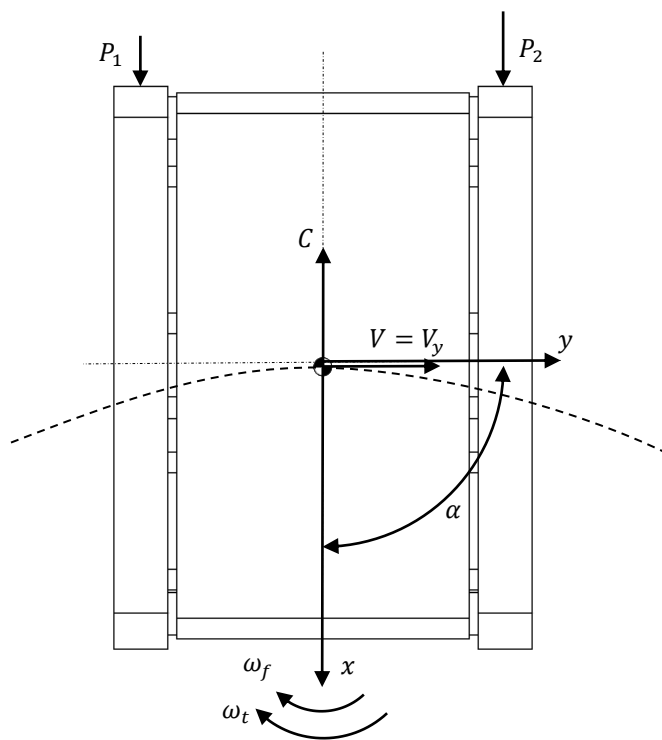


Рис. 2. Схема неуправляемого заноса гусеничной машины

Fig. 2. Scheme of uncontrolled skidding of a tracked vehicle

Физически величина $V_{кр1}$ соответствует скорости начала заноса машины, однако управляемое движение машины все еще возможно (управляемый занос, рис. 1). Величина $V_{кр}$ соответствует полному заносу машины, когда продольная ось перпендикулярна траектории (рис. 2). Очевидно, что управляемое (и вообще сколько-нибудь продолжительное) движение в таких условиях невозможно.

Величины $V_{кр1}$ и $V_{кр}$ удобно использовать для теоретических исследований, однако они не подходят для создания системы управления поворотом ГМ из-за необходимости знать свойства опорного основания перед машиной, т.е. коэффициенты сцепления с грунтом μ и μ_{max} . По этой причине интерес исследователей привлекает возможность определения наступления заноса по параметрам, которые сравнительно просто измерить в процессе движения ГМ. Наиболее удобными величинами здесь являются фактическая и теоретическая скорость поворота корпуса ГМ вокруг вертикальной оси. Фактическая угловая скорость корпуса ω_f может быть определена напрямую с помощью достаточно простого датчика угловых скоростей, а теоретическая угловая скорость вычисляется из скоростей вращения ведущих колес ГМ по формуле [5]:

$$\omega_t = \frac{\omega_2 - \omega_1}{B},$$

где ω_2 и ω_1 – скорости вращения ведущих колес забегающего и отстающего бортов соответственно, 1/с.

Известно, что по мере приближения скорости движения ГМ к критической по заносу, фактическая угловая скорость стремится к теоретической. В работах [6, 7] предлагается оценивать наступление заноса с помощью критерия как K_1 – отношения теоретической и фактической скорости поворота:

$$K_1 = \frac{\omega_t}{\omega_f}.$$

В реальных условиях ГМ совершает разгоны, торможения, неустановившиеся повороты, проявляя себя как сложная нелинейная механическая система. Поэтому для разработки алгоритмов системы помощи водителю наиболее эффективно использовать имитационное компьютерное моделирование.

Модель неустановившегося поворота гусеничной машины

В работе используется имитационная компьютерная модель, где движение ГМ представляется в виде плоского движения твердого тела в горизонтальной плоскости [8]. Взаимодействие движителя с опорным основанием вычисляется индивидуально для каждого опорного катка (а точнее, активного участка гусеницы под ним). Перераспределение нормальных нагрузок между опорными катками в результате действия внешних сил учитывается исходя из совместности деформации подвесок [9]. В [10] предложена структура системы управления, позволяющая осуществлять управление моментом на ведущих колесах, обеспечивая поддержание заданного фактического радиуса поворота и скорости движения. Данная система управления используется для имитации управляющих воздействий водителя при маневрировании ГМ.

Имитационное моделирование неустановившегося поворота гусеничной машины

Очевидно, не каждый занос приводит к потере управляемости ГМ. Так, в [6] приводится определение, согласно которому управляемым криволинейным движением ГМ следует считать возможность управляемого перехода из одного режима с установившимся движением в другой. Там же сказано, что движение ГМ является неуправляемым, если оно осуществляется независимо от управляющих воздействий, либо реакция машины на управляющее воздействие неопределенная.

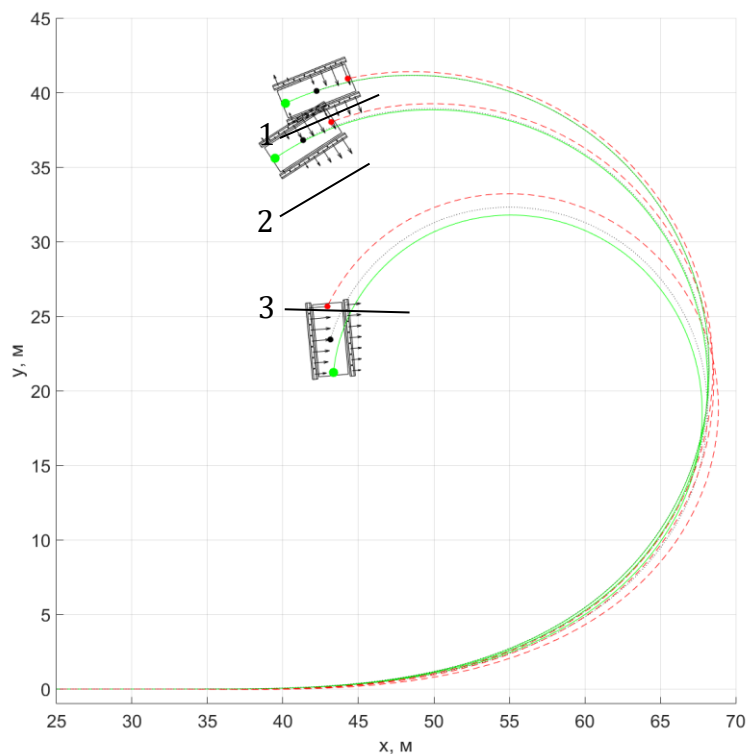


Рис. 3. Траектории корпуса гусеничной машины при прохождении поворота в различных режимах движения: 1 – $\mu_{max} = 0,6$; 2 – $\mu_{max} = 0,4$; 3 – $\mu_{max} = 0,25$; стрелками отмечены поперечные реакции грунта под опорными катками

Fig. 3. Trajectories of a tracked vehicle hull when passing a turn in various driving modes: 1 – $\mu_{max} = 0.6$; 2 – $\mu_{max} = 0.4$; 3 – $\mu_{max} = 0.25$; arrows indicate the transverse reactions of soil under support rollers

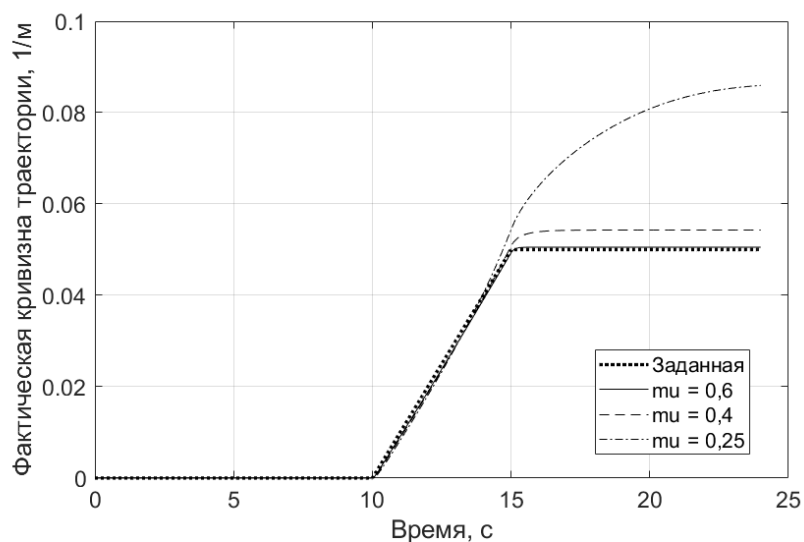


Рис. 4. Графики фактической кривизны траектории гусеничной машины при прохождении поворота в различных режимах движения

Fig. 4. Graphs of actual curvature of the tracked vehicle trajectory when passing a turn in different driving modes

Исходя из представленных соображений, для оценки управляемости ГМ предлагается использовать вычислительный эксперимент, состоящий из следующих этапов:

- ГМ разгоняется с места и начинает совершать установившееся прямолинейное движение;
- ГМ совершает неустановившийся поворот с возрастающей кривизной;
- ГМ совершает установившийся поворот.

Для дальнейших исследований было выбрано три режима движения: штатный поворот, где управляемое движение заведомо возможно, поворот с частичным заносом и поворот с полным заносом (табл. 1). Во всех случаях поддерживалась скорость $V_{пр} = 5,56$ м/с (20 км/ч) и фактический радиус $R_f = 20$ м (соответствует кривизне $k_f = 0,05$ 1/м).

Таблица 1.

Исходные данные для вычислительных экспериментов

Table 1.

Source data for computational experiments

Описание характера движения	μ_{max}	$V_{кр1}$	$V_{кр}$	$V_{пр}/V_{кр}$
Штатный поворот	0,6	9,027	10,848	0,52
Частичный занос	0,4	7,371	8,857	0,64
Полный занос	0,25	5,827	7,002	0,81

На рис. 3 показаны результаты проведенных вычислительных экспериментов в виде траекторий характерных точек корпуса ГМ (центр масс, нос и корма ГМ), по которым можно судить о развитии заноса в повороте.

На рис. 4 показано сравнение фактической кривизны в каждом вычислительном эксперименте с задаваемой кривизной. Очевидно, поведение ГМ при $\mu_{max} = 0,25$ можно охарактеризовать как потерю управляемости. Для указанных выше заездов было определено значение критерия управляемого движения K_1 (рис. 5). Значение критерия K_1 имеет склонность к осцилляции при прямолинейном движении ГМ, что затрудняет построение системы помощи водителю. Кроме того, наблюдается недостаточная чувствительность критерия K_1 при неустановившемся движении в повороте (10-15-я секунды моделирования на рис. 5). Поэтому использование критерия управляемого движения K_1 для определения и предотвращения заноса на практике затруднительно. В качестве критерия управляемого движения предлагается использовать угол увода α ГМ:

$$K_2 = \alpha = \arctg \frac{V_y}{V_x}$$

где V_x – продольная составляющая фактической скорости ГМ;

V_y – поперечная составляющая фактической скорости ГМ.

Графики значения угла увода α ГМ, полученные в ходе описанных ранее вычислительных экспериментов, представлены на рис. 6. Угол увода плавно и предсказуемо изменяется при развитии заноса, что делает эту величину пригодной для использования в качестве критерия управляемого движения ГМ. К сожалению, получение фактического угла увода с приемлемой точностью затруднительно, так как требует определения продольной и поперечной составляющей фактической скорости ГМ. Однако существует возможность косвенным образом вычислять угол увода с использованием нейронной сети, на вход которой будут подаваться параметры, которые в реальных условиях сравнительно просто определить с высокой точностью (например, величины скоростей поворота корпуса ω_t и ω_f).

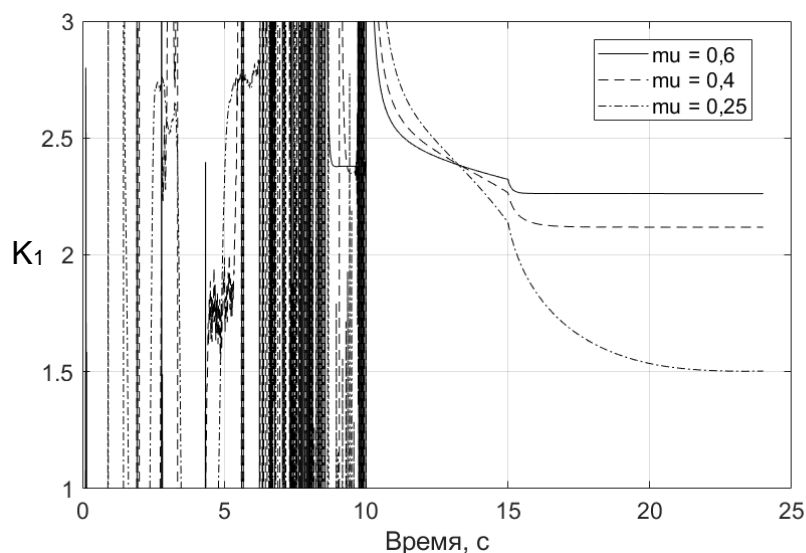


Рис. 5. Графики значения критерия управляемого движения K_1 гусеничной машины при прохождении поворота

Fig. 5. Graphs of the controlled movement criterion value K_1 of tracked vehicle when passing a turn

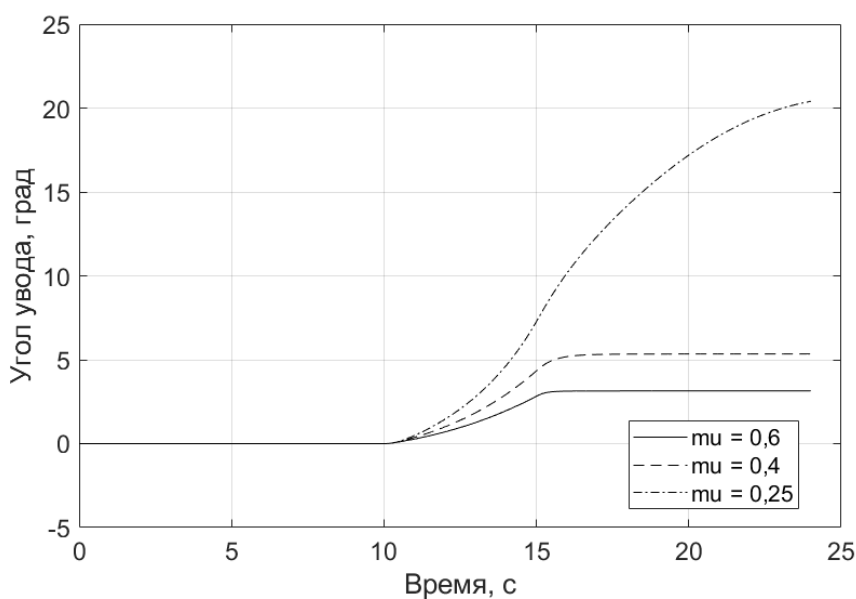


Рис. 6. Графики значения угла увода α гусеничной машины при прохождении поворота при разных режимах движения

Fig. 6. Graphs of the drift angle value α of tracked vehicle when passing a turn in different driving modes

Для формирования обучающего массива нейронной сети с использованием математической модели криволинейного движения ГМ было проведено большое количество вычислительных экспериментов (300 000) с варьированием условий движения (его диапазоны представлены в табл. 2). Эксперименты включали вход ГМ в поворот с последующим выходом из поворота на скорости, не приводящей к полному заносу (не более $0,7V_{кр}$).

Таблица 2.

Пределы варьирования параметров имитационного моделирования

Table 2.

Limits of variation of simulation parameters

Параметр	Пределы варьирования
Кривизна поворота ГМ k_f , 1/м	1/300...1/9
Коэффициент сцепления с грунтом μ	0,25...0,8
Скорость прямолинейного движения $V_{пр}$, м/с	1...(0,7 $V_{кр}$)

Проверка способности нейронной сети вида $\alpha = f(\omega_t, \omega_f)$ вычислять фактический угол увода выявила ее недостаточную точность (рис. 7). Исходя из предположения, что это вызвано дефицитом данных о силовых параметрах движения машины, предложено дополнить входной вектор значений нейронной сети такой величиной, как удельная разница значений сил тяги на бортах ГМ ΔF_T , которая вычисляется по формуле:

$$\Delta F_T = \frac{P_2 - P_1}{m \cdot g},$$

где P_2 и P_1 – силы тяги на ведущих колесах забегающего и отстающего бортов соответственно, Н; m – масса ГМ, кг.

На рис. 7 представлен вычислительный эксперимент при $\mu_{max} = 0,25$, где сравниваются результаты вычисления угла увода нейронными сетями $f(\omega_t, \omega_f)$ и $f(\omega_t, \omega_f, \Delta F_T)$ с истинным значением.

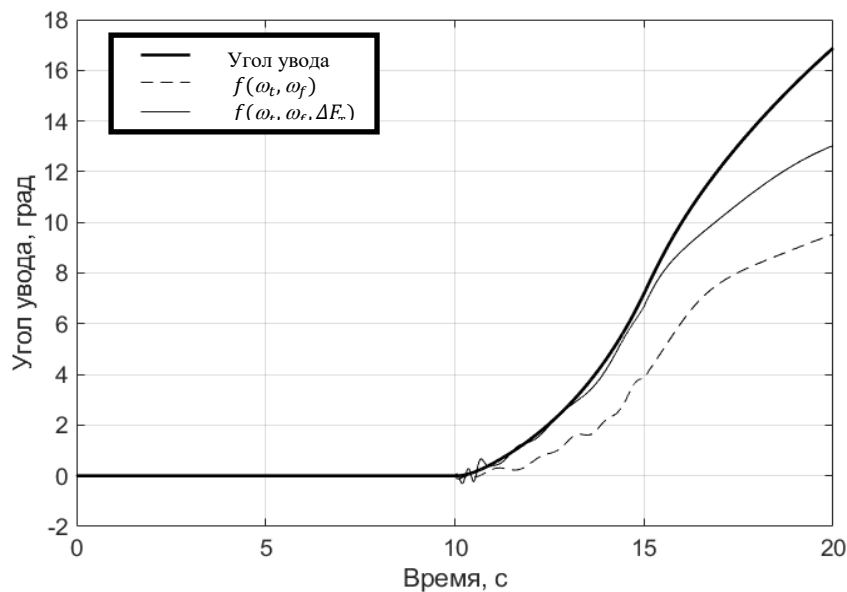


Рис. 7. Сравнение угла увода, вычисленного с помощью нейронных сетей, с истинным значением

Fig. 7. Comparison of the drift angle calculated using neural networks, with the true value

Данные результаты позволяют утверждать, что нейронная сеть вида $f(\omega_t, \omega_f, \Delta F_T)$ пригодна для практического определения угла увода по известным кинематическим и силовым факторам поворота ГМ. Зная действительный угол увода с приемлемой точностью, возможно создать систему помощи водителю, способную поддерживать скорость движения ГМ такой, чтобы угол увода находился в заданных пределах. Система, с одной стороны, не должна позволять машине достигать критической скорости движения, с другой стороны, не должна влиять на управление водителем кривизной траектории и приводить к резкому торможению. Ограничение

скорости движения машины предлагается осуществлять путем уменьшения управляющего воздействия, отвечающего за поступательное движение машины (т.е. сигнала управления тягой). Принципиальное устройство системы помощи водителю показано на схеме (рис. 8).

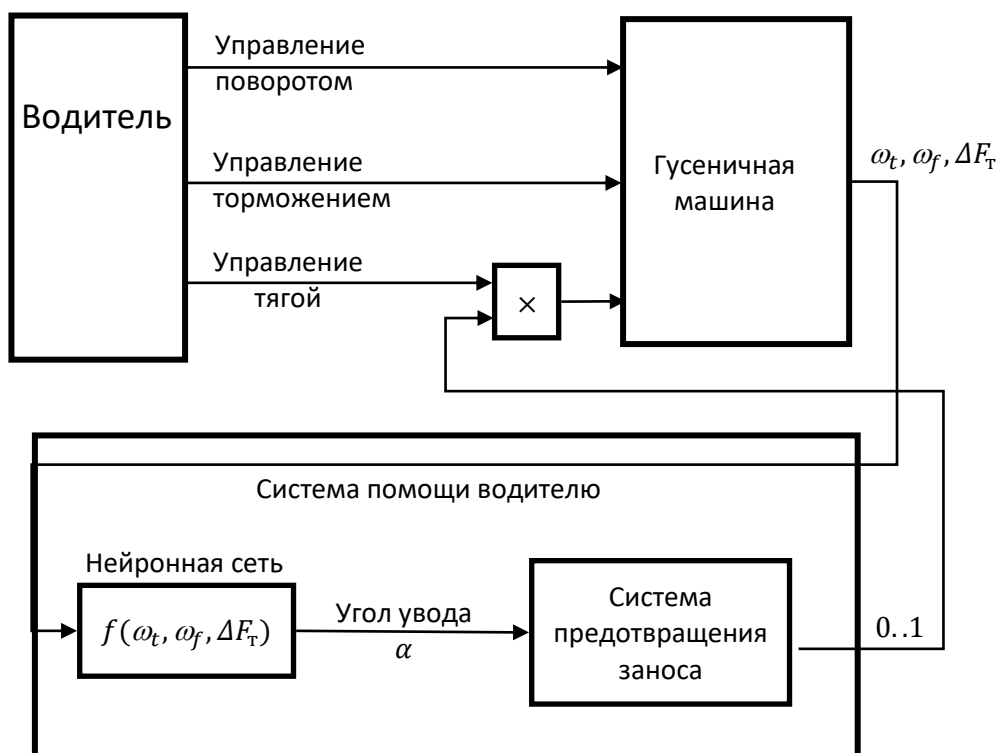


Рис. 8. Схема системы управления движением ГМ и системы помощи водителю ГМ в повороте

Fig. 8. Scheme of the TV movement control system and the system of assistance to a TV driver in turning

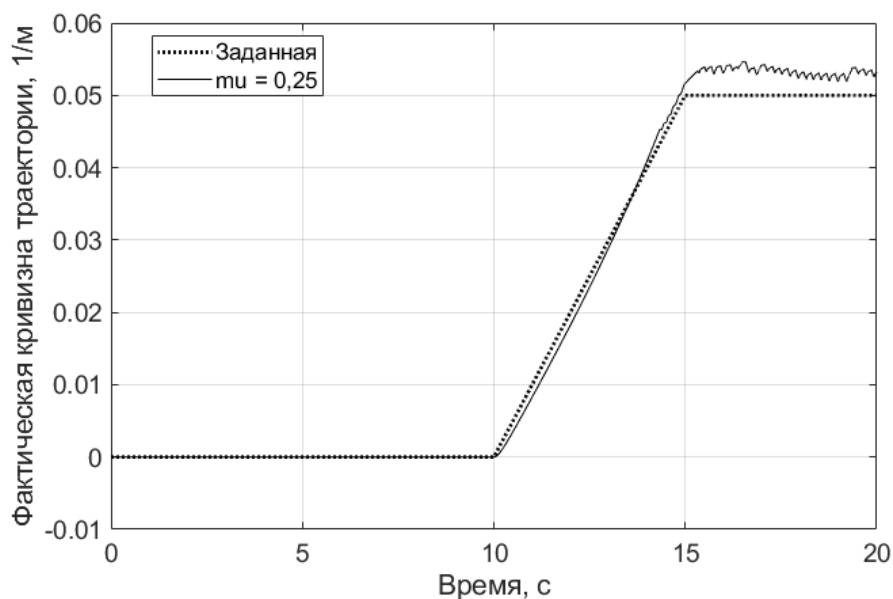


Рис. 9. Графики фактической кривизны траектории гусеничной машины при прохождении поворота в различных режимах движения

Fig. 9. Graphs of actual curvature of a tracked vehicle trajectory when passing a turn in various driving modes

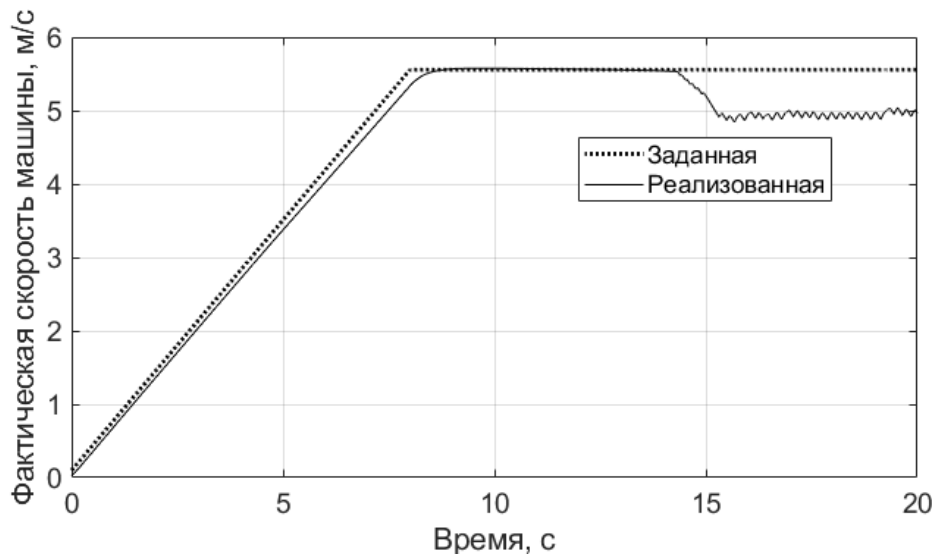


Рис. 10. Зависимость скорости гусеничной машины от времени при работе системы помощи водителю

Fig. 10. Dependence of the tracked vehicle speed on time during operation of the driver assistance system

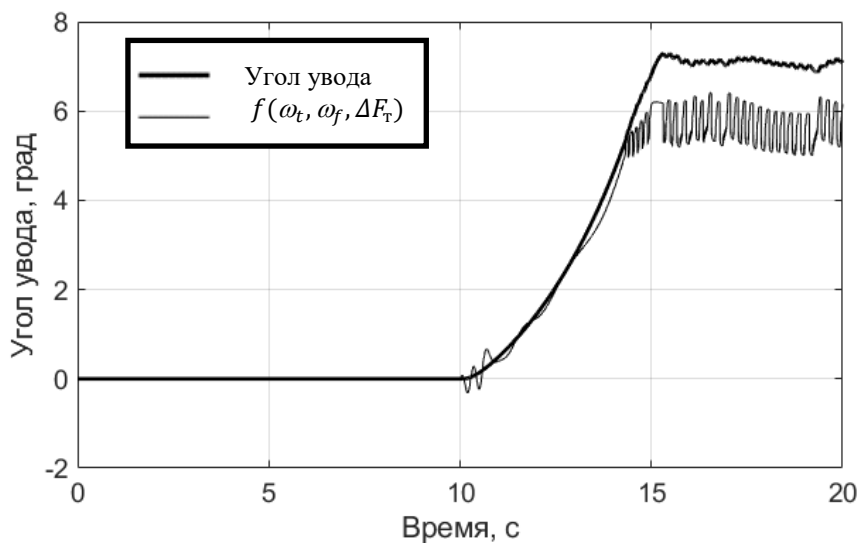


Рис. 11. Сравнение угла увода, вычисленного с помощью нейронной сети, с истинным значением при работе системы помощи водителю

Fig. 11. Comparison of the drift angle calculated using a neural network, with the true value during operation of the driver assistance system

На рис. 9-11 представлены результаты вычислительного эксперимента по оценке управляемости ГМ, оснащенной системой помощи водителю. Условия моделирования идентичны эксперименту «полный занос» (табл. 1). Система предотвращения заноса была настроена таким образом, чтобы уменьшать сигнал управления тягой ГМ, когда угол увода превышает 5° .

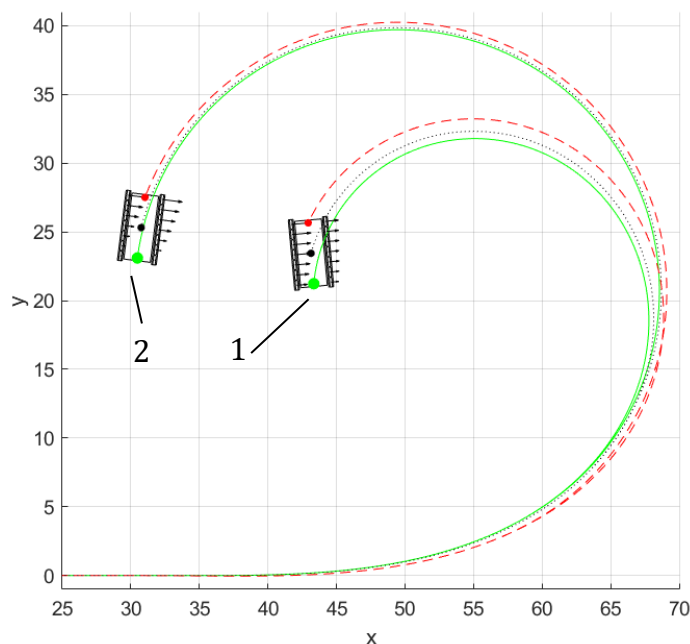


Рис. 12. Траектории корпуса гусеничной машины при прохождении поворота ($\mu_{max}=0,25$)

*1 – траектория при отсутствии системы помощи водителю;
2 – траектория при наличии системы помощи водителю;
стрелками отмечены поперечные реакции грунта под опорными катками*

Fig. 12. Trajectories of the tracked vehicle hull when passing a turn ($\mu_{max}=0.25$)

*1 – trajectory with the driver assistance system unavailable;
2 – trajectory with the driver assistance system available;
arrows indicate the transverse reactions of soil under support rollers*

Анализ результатов моделирования позволяет судить о том, что реализованная кривизна траектории в целом соответствует заданной, и машина сохранила управляемость (рис. 12). Это произошло благодаря тому, что система помощи водителю оказалась способна вычислить угол увода с достаточной точностью и уменьшить тягу ГМ, несмотря на ошибочное управляющее воздействие водителя (рис. 10).

Заключение

Общепринятый подход к определению границ управляемого движения через отношение величин теоретической и фактической угловой скорости корпуса ГМ не вполне соответствует практическому созданию системы помощи водителю в повороте.

Предложено создать систему помощи на основе ограничения действующего угла увода, который, в свою очередь, необходимо вычислять с помощью нейронной сети по теоретической и фактической угловой скорости корпуса ГМ и относительной разнице сил тяги на бортах. Показана работоспособность предложенной системы помощи водителю в условиях вычислительного эксперимента.

Библиографический список

1. **Talvala K.L.**, Gerdes JC. Lanekeeping at the limits of handling: Stability via Lyapunov functions and a comparison with stability control. Dynamic Systems and Control Conference. Ann Arbor. 2008. p. 361-368.
2. **Nitin R. Kapania.** J. Christian Gerdes. Design of a feedback-feedforward steering controller for accurate path tracking and stability at the limits of handling. Vehicle System Dynamics. 2015. p.1687-1704. DOI: 10.1080/00423114.2015.1055279
3. **Девятковский, Ф.А.** Оценка влияния скорости на криволинейное движение и разработка требований к механизмам поворота танка. дисс. ... канд. техн. наук / Ф.А. Девятковский. – М.: ВА БТВ. 1978. – 131 с.
4. **Забавников, Н.А.** Основы теории транспортных гусеничных машин / Н.А. Забавников. – М.: Машиностроение. 1967. – 356 с.
5. **Чобиток, В.А.** Теория движения танков и БМП / В.А. Чобиток. – М.: Воениздат, 1984. – 264 с.
6. **Бекетов С.А.** Теория управляемого движения гусеничных машин / С.А. Бекетов. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2017. – 125 с.
7. **Наумов, В.Н.** Алгоритм предотвращения неуправляемого движения гусеничных роботов / В.Н. Наумов, К.Ю. Машков, А.А. Пехтерев, В.И. Рубцов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 1(186). С. 29-42.
8. **Котиев, Г.О.** Разработка высокоподвижных бронированных колесных и гусеничных машин нового поколения / Г.О. Котиев, А.В. Мирошниченко // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 3(15). С. 30.
9. **Котиев, Г.О.** Математическое моделирование рабочих процессов колесных и гусеничных машин с электромеханическими трансмиссиями / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко // В кн.: Сборник статей научно-практической конференции: Разработка и исследование электрических трансмиссий для образцов вооружения и военной техники. 2016. С. 76-86.
10. **Горелов, В.А.** Регулятор системы управления поворотом быстроходной гусеничной машины с индивидуальным приводом ведущих колес / В.А. Горелов, Б.Б. Косицын, А.В. Мирошинченко, А.А. Стадучин // Известия МГТУ «МАМИ». 2019. Вып. №4 (42). С. 21-28.

*Дата поступления
в редакцию: 11.03.2022*