

В.Н. Наумов, К.Ю. Машков, А.А. Пехтерев, В.И. Рубцов

**АЛГОРИТМ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НЕУПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ
ГУСЕНИЧНЫХ РОБОТОВ***

Эффективность применения автономных мобильных роботов во многом зависит от системы управления движением. Для экипажной машины вопрос подбора оптимальной скорости движения решает механик-водитель. Скорость движения автономных роботов, особенно по сильно пересечённой местности, существенно ниже и вызвано это работой автономной системы управления. В гусеничных шасси одной из составляющих быстроходности известно такое свойство, как поворотливость, которая характеризует управляемость транспортным средством в заданных условиях. Поведение мобильного робота при повороте зависит не только от удельной мощности, но и от размеров опорных поверхностей гусениц; давления на грунт; радиусов поворота, обеспечиваемые механизмами поворота; сцепных свойств, а также от дорожных условий (радиус поворота, коэффициенты сопротивления движению и повороту). В работе проведён анализ зависимостей скоростей проскальзывания гусениц от скорости движения шасси гусеничного робота. Для подтверждения граничного условия управляемого криволинейного движения шасси робота проводился количественный анализ движения шасси для различных внешних условий и режимов движения. Определены параметры, определяющие состояние шасси мобильного гусеничного робота по управляемости. В статье предложен алгоритм критического управления по предотвращению неуправляемого движения (преодолению заноса) для автономных мобильных гусеничных роботов. Приведено теоретическое обоснование разработанного метода. Предложена структурная схема системы автоматического управления движением автономного мобильного робота, для предотвращения неуправляемого движения. Проведено математическое моделирование движения гусеничного мобильного робота по разным типам грунтов и с разными скоростями в программных пакетах «Универсальный механизм» и «Simulink MATLAB». Приведены результаты моделирования.

Гусеничный робот; система управления движением неуправляемое движение.

V.N. Naumov, K.Yu. Mashkov, A.A. Pehterev, V.I. Rubtsov

**THE ALGORITHM PREVENT OF UNCONTROLLABLE MOVEMENT
FOR TRACKED ROBOTS**

Efficiency of application of autonomous mobile robots depends largely on the control system for movement. For the crew part of the machine, the issue of selection of optimal speed decides the mechanic-the driver. The speed of movement of autonomous robots, especially on rough terrain, substantially lower and it was caused by the control system. In crawler one of the components of the specific speed is known, a feature like turning that characterizes the controllability of a vehicle under specified conditions. The behavior of a mobile robot in turn depends not only on power density but also on the dimensions of the bearing surfaces of the tracks; pressure; radius of rotation provided by the rotation mechanism; coupling properties, as well as road conditions (turn radius, the coefficients of resistance to movement and rotation). In work the analysis of the dependencies of the velocity of slipping of the tracks from speed chassis tracked robot. To confirm the boundary conditions of controlled curvilinear motion of the chassis of the robot was carried out a quantitative analysis of the movements of the chassis for different ambient conditions and driving modes. The parameters of determining the state of the chassis tracked mobile robot for handling the article the algorithm of a critical control to prevent uncontrollable movement (the overcoming of introduction) for Autonomous mobile tracked robot. The theoretical justification of

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 16-29-04178-офи_м.

the developed method. The proposed structural scheme of automatic control system of movement of the Autonomous mobile robot to prevent uncontrollable movement. The mathematical modeling of the movement of the tracked mobile robot for different types of soils and with different speeds in the software package "Universal mechanism" and "MATLAB Simulink". The results of modeling are shown.

Tracked robot; control system of movement; uncontrolled motion.

Введение. В настоящее время разработка и внедрение технологий военной робототехники является одним из приоритетных направлений, используемых при создании новых и модернизации существующих образцов военной техники. Это обусловлено тем, что за последние 10 лет в области военной робототехники произошли кардинальные изменения, связанные, прежде всего, с массовым производством и испытанием в реальных условиях боевых и обеспечивающих робототехнических комплексов (РТК) вооруженными силами США и их союзников.

На ряду с этим, современные технологии по конструированию моторно-трансмиссионной группы и ходовой части позволяют передвижение РТК с скоростями не ниже чему у существующей боевой техники., в частности для гусеничной, на дорогах с твёрдым покрытием (60–70 км\час), а по пересечённой местности (25–35 км\час).

Следует подчеркнуть, что указанные выше скорости передвижения ограничены во первых, возможностью системы ДУ или автономного управления, во вторых способностью системы управления превосходить момент наступления критической ситуации. Поэтому потенциальный рост средних и максимальных скоростей будет осуществляться по мере развития технологий роботизации ВВТ.

Тем более что опыт последних локальных войн выявил тенденцию существенных изменений средств вооруженной борьбы и связанных с ними форм ведения боевых действий. Появление на поле боя высокоточного интеллектуального оружия привело к повышению скоротечности боя, что обуславливает увеличение потока информации и сокращает время управления войсками. В этих условиях требования к подвижности как экипажных (ЭВТ), так и без экипажных (БЭВТ), образцов вооружения и техники значительно ужесточаются.

Поэтому цель данной работы – попытка найти критерий, позволяющий определить момент наступления неуправляемого движения при отсутствии механика-водителя.

Преимущество в научных подходах в исследовании экипажных и безэкипажных шасси. В настоящий момент имеется достаточное количество исследований в области подвижности БЭВТ, в частности в наиболее представительной группе - военные гусеничные машины (ВГМ) [1–10]. Скорость зависит от таких свойств шасси, как управляемость и плавность хода, а с увеличением удельной мощности увеличивается влияние управляемости на скорость движения ВГМ.

На рис. 1 приведено графическое изображение влияния основных параметров шасси на скорости движения танков – максимальную v_{max} и среднюю на сухих грунтовых дорогах $v_{сгд}$.

Традиционно быстроходность образцов бронетанкового вооружения (БТВТ) повышалась за счет увеличения удельной мощности, повышения плавности хода и совершенствования механизма поворота. Так, только за последние 50 лет, удельная мощность образцов БТВТ возросла с 10 до 32 л.с./т, т.е. увеличилась в 3 раза. Однако средняя скорость повысилась не более чем на 30 %.

Вместе с тем степень влияния удельной мощности на среднюю скорость зависит от таких свойств шасси, как управляемость и плавность хода, а с увеличением удельной мощности увеличивается влияние управляемости на скорость движения ВГМ.

На рис. 1 приведено графическое изображение влияния основных параметров шасси на скорости движения танков — максимальную v_{max} и среднюю на сухих грунтовых дорогах $v_{сгд}$.

Из графиков, представленных на рис. 1 следует: зависимость средней скорости от удельной мощности существенно нелинейна в диапазоне удельных мощностей 10–15 кВт/т, и увеличение удельной мощности на 20 % приводит к увеличению средней скорости на 15 %; В гусеничных шасси одной из составляющих быстроходности известно такое свойство, как поворотливость, которая характеризует управляемость ГМ в заданных условиях. Поведение машины в повороте зависит не только от удельной мощности, но и от других технических параметров (размеры опорных поверхностей гусениц; давление на грунт; радиусы поворота, обеспечиваемые механизмами поворота; сцепные свойства; устойчивость гусениц в обводе и др.), а также от дорожных условий (радиус поворота, коэффициенты сопротивления движению и повороту).

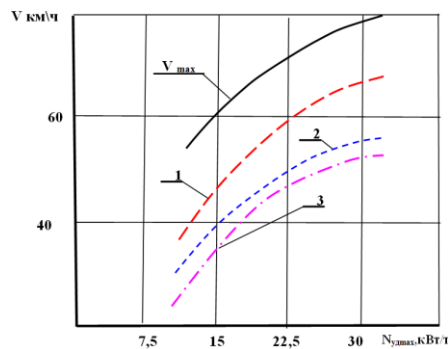


Рис. 1. Влияние ограничивающих факторов на максимальную v_{max} и среднюю $v_{сгд}$ скорости движения при различных уровнях удельной мощности $N_{уд}$ *тах*:
1 – фактор внешних условий; 2 – управляемость; 3 – плавность хода

В диапазоне 25–30 кВт/т тому же увеличению $N_{уд}$ на 20 % соответствует рост $v_{ср}$ всего на 6 %.

Кроме того, на скорость в повороте оказывают влияние такие факторы, как несовпадение радиусов поворота дорог с обеспечиваемыми механизмами поворота, необходимость поворота на заданный угол, неопределенность траектории движения при частичном перемещении органа управления поворотом, соотношение между внешними габаритными размерами ВГМ и шириной проезжей части дороги и др.

Всё это обостряет противоречия между повышающимися техническими возможностями образцов по быстроходности и степенью их реализации в условиях войсковой эксплуатации.

На практике динамичность образцов БТВТ реализуется через мастерство механика-водителя и как показали ранее проведенные исследования, уровень использования скоростных возможностей образцов БТВТ составляет от 65 % у механиков-водителей третьего класса (уровень достижений танка робота Т-72Б при автономном управлении).

Уровень использования скоростных возможностей образцов БТВТ у мастеров вождения до 90 % и это резерв, в 25%, который необходимо использовать [12–16].

На настоящий момент современные технологии по конструированию моторно – трансмиссионной группы и ходовой части позволяют передвижение гусеничных робототехнических систем РТС со скоростями не ниже, чем у существующей боевой техники как на дорогах с твёрдым покрытием (60–70 км\час), так и по пересечённой местности (25–35 км\час).

Следует подчеркнуть, что указанные выше скорости передвижения ограничены возможностью системы ДУ и потенциальный рост средних и максимальных скоростей будет осуществляться по мере развития технологий роботизации ВВТ.

Наибольшие сложности при автономном движении испытывает СУ РТС при обеспечении криволинейного движения со скоростями поворота, предельных по заносу и сцеплению [5, 12, 17]. Поскольку СУ не известны признаки появления бокового заноса и она должна снижать скорость движения во избежание потери управления или аварийной ситуации.

Для решения этой коллизии по выработке признаков предшествующих заносу рассмотрим влияние центробежной силы на поворот РТС.

Процесс поворота двухгусеничного шасси [5] представлен на рис. 2.

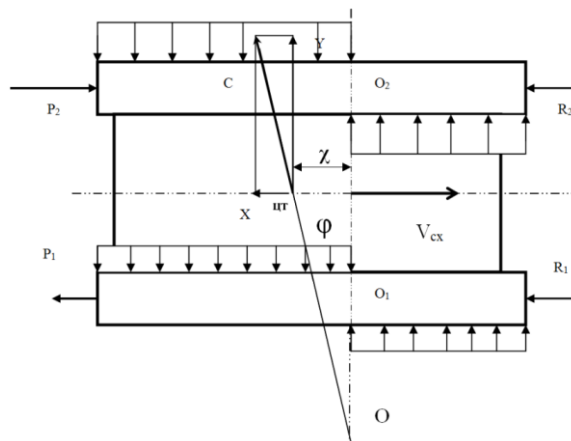


Рис. 2. Процесс поворота двухгусеничного шасси

Центробежная сила (С) вызывает смещение полюса (О) поворота вперед на величину:

$$\chi = YL/2\mu G.$$

Центробежная сила $C = G \omega^2 R_c / g$.

Поперечная составляющая центробежной силы

$$Y = C \cos \varphi = C (R - B/2) / R_c.$$

Подставляя значения С, получим

$$Y = (G/g) \omega^2 (R - B/2) \text{ но } \omega = V_{cx} / (R - B/2), \text{ тогда}$$

$$Y = (G/g) (V_{cx}^2 / (R - B/2)),$$

Продольная составляющая центробежной силы $X = Y \operatorname{tg} \varphi$,

но $\operatorname{tg} \varphi = \chi / (R - B/2)$, то

$$X = Y^2 L / 2\mu G (R - B/2),$$

Момент сопротивления повороту при наличии продольных смещений полюсов поворота будет равен

$$M_c = \mu GL/4 [1 + (2 \chi/L)^2]$$

Сила P_2 определится из уравнения моментов всех сил относительно полюса поворота O_1 а сила P_1 – из уравнения моментов относительно полюса поворота O_2 .

$$P_2 = R_2 + \mu GL/4B [1 + (2 \chi/L)^2] + X/2$$

$$P_1 = -R_1 + \mu GL/4B [1 + (2 \chi/L)^2] - X/2$$

Обоснование критериев управляемого поворота. Анализируя эти формулы, можно прийти к следующим выводам.

С увеличением скорости РТС при неизменном радиусе поворота сила P_2 , с одной стороны, уменьшается (несмотря на увеличение M_c) в результате действия поперечной составляющей центробежной силы, создающей поворачивающий момент, и, с другой стороны, она увеличивается вследствие увеличения продольной составляющей центробежной силы X и силы R_2 . В итоге при реальных соотношениях R и V сила P_2 уменьшается.

Сила P_1 уменьшается с увеличением скорости в результате действия поперечной составляющей центробежной силы Y и продольной составляющей центробежной силы X , несмотря на увеличение M_c и уменьшение R_1 .

Важной характеристикой управляемости гусеничной машины является скорость, критическая по условиям заноса. Для того, чтобы определить эту характеристику, необходимо детально рассмотреть процесс движения гусеничной машины на скоростях, близких к границе управляемого движения.

Занос РТС начнется при $\chi = L/2$, когда $Y = \mu G$ т.е. поперечная составляющая центробежной силы будет уравниваться поперечными реакциями грунта, действующими с одной стороны на всей длине опорной поверхности гусениц.

С другой стороны

$$Y = (G/g) (V_{cx}^2 \setminus (R - B/2),)$$

Отсюда критическая скорость, при которой начнется занос, будет равна:

$$V_{скр} = \sqrt{\mu g(R - B/2)}.$$

Значение μ , вне зависимости от того, с каким радиусом поворачивается РТС, берем равным μ_{max} , так как при заносе вследствие большого бокового перемещения гусеницы касательные реакции на неё со стороны грунта достигает максимального значения.

Из рис. 3 видно, что опасность заноса накладывает ограничения на скорости движения ВГМ.

Критическая скорость по заносу определяется экспериментально [18] во время прохождения «змейки», представленной на рис. 4.

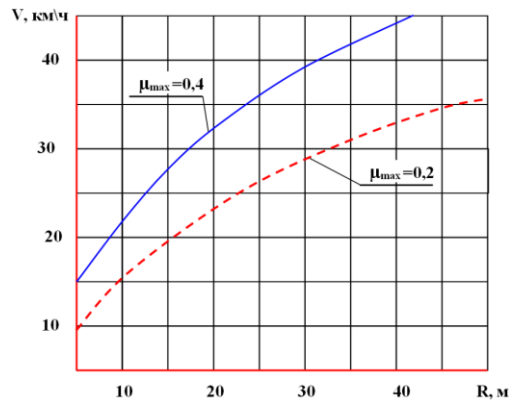


Рис. 3. Зависимость критической скорости от радиуса поворота

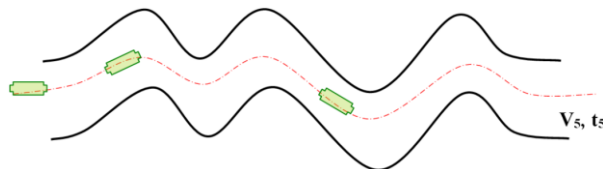


Рис. 4. Экспериментальная трасса

Зависимость относительного смещения мгновенного центра поворота машины от относительной скорости представлена на рис. 5:

$$\chi/l_c = f(V_c/V_{кр}),$$

где χ – величина смещения мгновенного центра поворота машины; l_c ($L/2$) – расстояние от центра масс машины до передней границы опорной поверхности гусениц; V_c – скорость машины при движении с постоянным радиусом поворота; $V_{кр}$ – критическая скорость по заносу для данного радиуса.

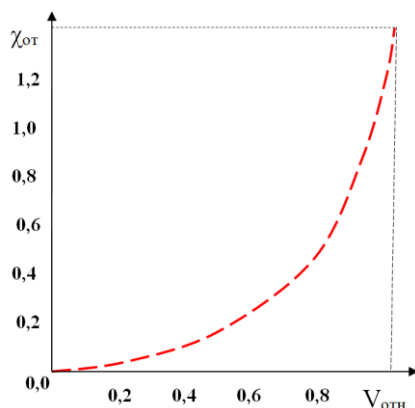


Рис. 5. Кривая зависимости относительного смещения мгновенного центра поворота машины от относительной скорости движения [8, 9]

Основным оценочным критерием управляемости гусеничных РТС является средняя скорость прохождения трассы «змейка», характеризующая способность машины реализовывать свои потенциальные возможности при действии ограничений по управляемости.

Вспомогательными показателями являются критические по заносу скорости движения и разгонные характеристики.

Применение трассы типа «змейка» с переменной по величине и направлению кривизны позволяет оценить управляемость при наиболее критических режимах движения, которыми являются смена направления движения машины на противоположное.

Воздействуя на органы управления, может в любой момент времени изменить режим движения машины в соответствии с внешними условиями.

Что касается возможности существования управляемого движения гусеничной машины, то здесь возможен следующий подход. Процесс управления – это перевод системы из одного состояния в другое, каждое состояние характеризуется определённым набором управляющих параметров, к которым, прежде всего, можно отнести скорость движения центра масс машины и выбранное передаточное отношение механизма поворота. Если в каждом состоянии возможно установившееся движение, то и переходный процесс от одного состояния в другое будет управляемым, в противном случае переходный процесс и последующее состояние будут неопределёнными.

Рассмотрим управляемое криволинейное движение гусеничной машины [5]. При управляемом движении центр масс гусеничной машины будет двигаться по касательной к траектории движения, а продольная ось будет поворачиваться вокруг центра масс на дополнительный угол β относительно касательной к траектории движения (рис. 6).

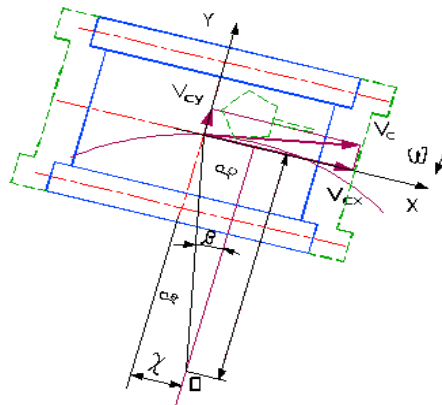


Рис. 6. Положение шасси РТС при управляемом криволинейном движении

Здесь χ – продольное смещение мгновенного центра поворота шасси РТС, R_c – радиус траектории центра масс шасси РТС, r_ϕ – фактический радиус поворота гусеничного шасси, V_c – скорость движения центра масс гусеничного шасси, V_{cx} – скорость движения шасси РТС вдоль продольной оси, V_{cy} – скорость движения шасси РТС вдоль поперечной оси.

Поворот продольной оси шасси РТС относительно касательной к траектории происходит из-за наличия юза и буксования гусениц. Рассмотрим, как юз и буксование гусениц влияют на фактические параметры движения шасси РТС.

На плане скоростей, показанном на рис. 7, V_2 и V_1 – относительные скорости движения центров масс соответственно забегающей и отстающей гусениц (скорости перематывания гусениц относительно корпуса шасси РТС), V_{22} и V_{11} – переносные скорости движения центров масс забегающей и отстающей гусениц, V_{S2} и V_{S1} – скорости проскальзывания гусениц, r_T – теоретический радиус поворота шасси ВГМ, ω – угловая скорость поворота шасси РТС.

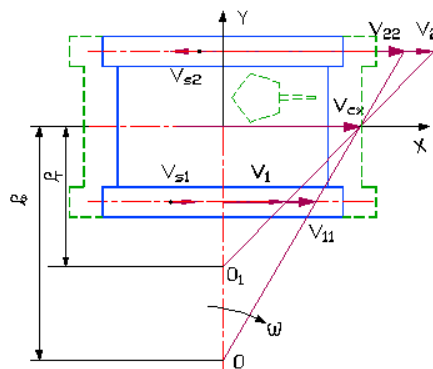


Рис. 7. План скоростей гусеничного шасси РТС при повороте

Из плана скоростей видно, что

$$V_{cx} = (V_{22} - V_{11})/2 = V_T - (V_{S2} - V_{S1})/2.$$

Здесь, V_T – теоретическая скорость движения центра масс шасси РТС.

$$\omega = (V_{22} - V_{11})/B = \omega_T - (V_{S2} - V_{S1})/B,$$

где ω_T – теоретическая угловая скорость движения шасси РТС; B – ширина колеи шасси РТС.

Увеличение скорости движения шасси РТС ведёт к увеличению угла рассогласования β . При приближении к границе управляемого движения $\beta \rightarrow 90^\circ$, при этом продольная скорость движения машины будет стремиться к нулю ($V_{cx} = V_c \cos\beta \rightarrow 0$). Таким образом, при $\beta \rightarrow 90^\circ$ поступательного движения гусеничного шасси вдоль продольной оси не будет, а скорости буксования гусениц будут стремиться к скоростям перематывания гусениц относительно корпуса.

При этом, при приближении к критической скорости по управляемости отстающая гусеница из режима юза переходит в режим буксования. Скорость буксования забегающей гусеницы увеличивается и при движении с заносом обе гусеницы имеют соизмеримые коэффициенты буксования (рис. 8).

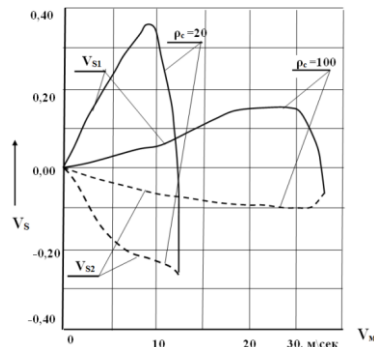


Рис. 8. Характер изменения скоростей проскальзывания гусениц от скорости движения шасси РТС

В данном процессе наблюдается условие существования режима движения машины, при котором скорости буксования гусениц будут одинаковы $V_{s2} = V_{s1}$. В этом случае, граничные условия управляемого движения шасси РТС характеризуются следующим выражением

$$\omega_T = \omega$$

т.е. равенством реальной угловой скорости шасси РТС, при заданных внешних условиях, к угловой скорости, определяемой кинематикой его механизма поворота, при приближении скорости движения шасси к критической, по управляемости, скорости [18–21].

Продемонстрируем граничного условия управляемого криволинейного движения шасси РТС при следующей характеристике взаимодействия траков гусеничной цепи с грунтом (рис. 9).

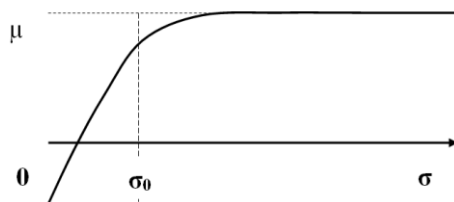


Рис. 9. Характеристики взаимодействия траков гусеничной цепи с грунтом

Поворот осуществляется от некоторой угловой скорости ω , обусловленной характеристикой механизма поворота и режимом движения гусеничного шасси, с учётом, что граничное условия управляемого движения $\omega_T = \omega$ которое достаточно точно характеризует момент наступления неуправляемого движения

На зависимости $\omega_T \setminus \omega = f(V \setminus V_{кр})$ (рис. 10) видно, что становленное граничное условие управляемого движения $\omega_T = \omega$ достаточно точно характеризует момент наступления неуправляемого движения. Здесь V – текущее значение скорости центра масс шасси ВГМ, $V_{кр}$ – критическое значение скорости шасси для данного радиуса поворота.

Из качественного и количественного анализа управляемого криволинейного движения шасси РТС, представленного на рис. 9–10, очевидно, что при создании системы автоматизированного управления поворотом относительная угловая скорость может быть использована для прогнозирования появления неуправляемого движения.

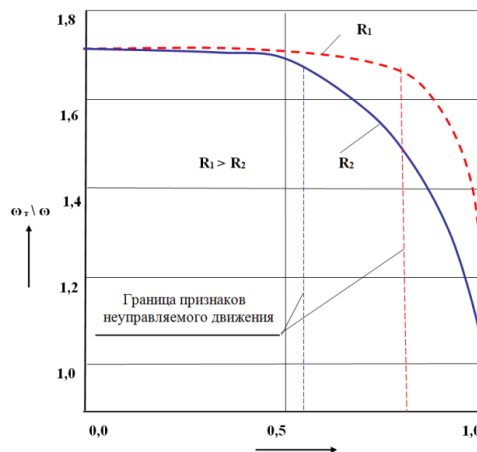


Рис. 10. Зависимости относительных угловых скоростей поворота от относительной скорости движения шасси для различных радиусов поворота

Преимущество этого параметра – не требуется сложных конструкторских решений, что позволит создать надёжную систему его измерений, что характеризует надёжность работы всей системы автоматизированного управления движением шасси РТС. Сам принцип замера этого параметра может быть реализован не только на новых, но и на находящихся в эксплуатации машинах при минимальных конструкционных доработках.

Таким образом, параметрами, определяющими состояние шасси РТС по управляемости, будут следующие:

- ◆ угловая скорость движения шасси;
- ◆ частота вращения ведущих колес шасси.

Алгоритм критического управления по предотвращению неуправляемого движения (преодолению заноса) РТС. Ниже приведён алгоритм управления РТС, повышающий управляемость движения.

При движении РТС определяются угловые скорости правого и левого борта, которые поступают в блок вычисления теоретической угловой скорости поворота шасси. Далее в блок деления. В блок деления поступает фактическая угловая скорость от датчиков. Далее сравнение с опорным сигналом и команда на исполнительный механизм.

Структурная схема системы представлена на рис. 11.

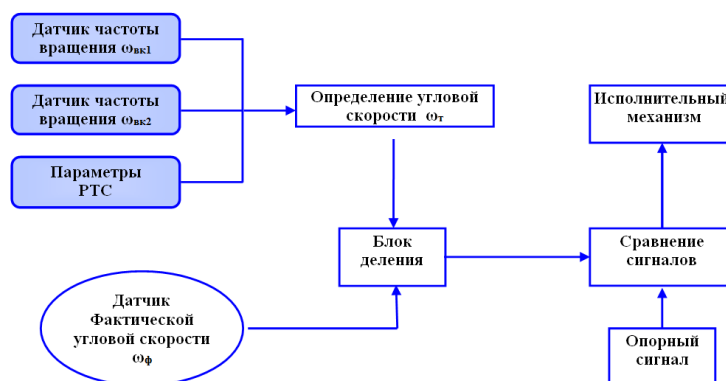


Рис. 11. Схема системы предотвращения неуправляемого движения РТС

Математическое моделирование движения гусеничного РТК по предложенному алгоритму. Для проверки описанной ранее гипотезы, было проведено моделирование движения гусеничного транспортного средства по дуге окружности в программных пакетах «Универсальный механизм» и «Simulink MATLAB» (рис. 12).

Моделирование производилось с различными скоростями при радиусе поворота 25 метров, в качестве модели грунта выбрана линейная упругая модель.

Результаты моделирования представлены на рис. 13–14.

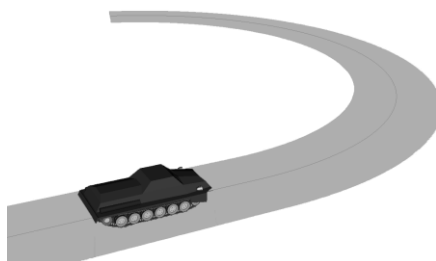


Рис. 12. Модель РТС в среде «Универсальный механизм»

Анализ результатов показал, что значение $\frac{\omega_T}{\omega} = 1$ является граничным условием появления признаков неуправляемого движения, что совпадает с теоретическими выкладками, представленными выше.

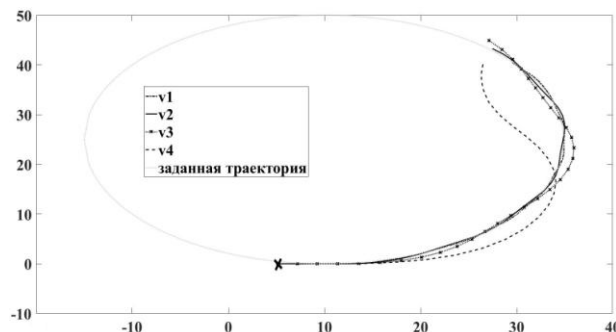


Рис. 13. Результаты моделирования поворота гусеничного движителя в

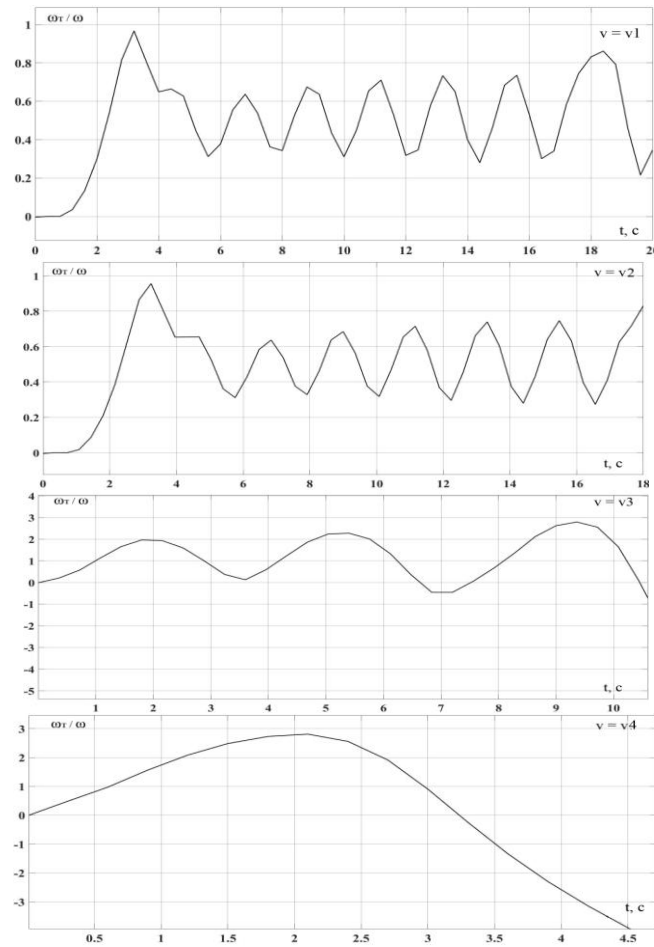


Рис. 14. Относительная угловая скорость $\frac{\omega_T}{\omega}$ для различных скоростей

Заключение. Предложенная схема, позволит создать алгоритм предотвращения неуправляемого движения гусеничных роботов в системе автоматического управления движением автономного мобильного робота. По результатам проведенного математического моделирования движения транспортного средства в среде «Универсальный механизм» по различным типам грунтов можно сделать вывод о хорошем совпадении с теоретическими выкладками, приведенными в статье.

Анализ расчётов показал, что значение $\frac{\omega_T}{\omega} = 1$ действительно является граничным условием появления признаков неуправляемого движения. Поэтому опираясь на алгоритм критического управления по предотвращению неуправляемого движения (преодолению заноса) при прохождении криволинейных участков можно повысить уровень использования скоростных возможностей образцов, как РТС, так и БТВТ на 10–15 %. Библиографический список

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лесин В.А.* Концептуальные взгляды на развитие отечественного вооружения и техники на 2030 годы и дальнейшую перспективу // Сборник материалов конференции «Перспективы развития бронетанкового вооружения до 2030 года». – Кубинка, 2015. – С. 4-32.
2. *Брюллов О.Н.* Танки. – М.: ООО изд-во «Планета», 2015. – 564 с.
3. *Беляков В.В. и др.* Вездеходные транспортно-технологические машины. – Н. Новгород: Изд-во «Талам», 2004. – 960 с.
4. *Никитин А.О., Сергеев Л.В.* Теория танка. – М.: Изд-во АБТВ, 1962. – 583 с.
5. *Васильченко В.Ф. и др.* Военные автомобили. – Рыбинск: ОАО «Рыбинский дом печати», 1976. – 659 с.
6. *Чобиток В.А.* Теория движения танков и БМП. – М.: Восниздат, 1984. – 264 с.
7. Теория и конструкция танка. Т. 1. Основы системы управления развитием военных гусеничных машин / под ред. Исакова Я.Я. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
8. Теория и конструкция танка. Т. 8. Параметры внешней среды, используемые в расчетах танков / под ред. Исакова Я.Я. – М.: Машиностроение, 1987. – 196 с.
9. *Держанский В.Б., Тараторкин И.А.* Алгоритмы управления движением транспортной машины: монография. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 142 с.
10. *Носов Н.А., Гальшиев В.Д., Волков Ю.И., Харченко А.И.* Расчёт и конструирование гусеничных машин. – Л.: Машиностроение, 1072. – 360 с.
11. *Савочкин В.А., Дмитриев А.А.* Статистическая динамика транспортных и тяговых гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1993. – 320 с.
12. *Карпов Е.К.* Повышение подвижности быстроходной гусеничной машины на основе перераспределения во времени управляющих силовых воздействий: дисс. ... канд. техн. наук. – 2014. – 150 с.
13. *Красеньков В.И., Харитонов С.А.* Динамика криволинейного движения транспортных гусеничных машин // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: МВТУ, 1984. – № 339. – С. 367-369.
14. Теория и конструкция танка. – Т. 10. Кн. 1. Испытания военных гусеничных машин / под ред. Исакова Я.Я. – М.: Машиностроение, 1989. – 232 с.
15. *Чобиток В.А.* Теория движения танков и БМП. – М.: Восниздат, 1984. – 264 с.
16. *Фаробин Я.Е.* Теория поворота транспортных машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 176 с.
17. *Шапкин А.Н.* Методика оценки управляемости гусеничных машин // 77-я Международная научно-техническая конференция «Автомобиле – тракторостроение в России». – С. 243-252.
18. *Дмитриев А.А., Ягубов В.Ф., Бекетов С.А.* К вопросу об управляемом движении гусеничной машины / ЦВНИ. – М., 1998. Деп. в ЦСИФ МО РФ 17.09.97; № В3416.
19. *Якубов В.Ф., Шапкин А.Н.* Обоснование условий потери управляемости гусеничных машин при повороте // 77-я Международная научно-техническая конференция «Автомобиле – тракторостроение в России». – С. 271-280.
20. *Брилев О.Н., Дмитриев А.А. [и др.]*. Оценка подвижности объектов бронетанковой техники. – М.: ВА БТВ, 1977. – 107 с.
21. *Савочкин В.А., Дмитриев А.А.* Теоретические основы статистической динамики транспортных и тяговых гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1993. – 320 с.

REFERENCES

1. *Lesin V.A.* Kontseptual'nye vzglyady na razvitie otechestvennogo vooruzheniya i tekhniki na 2030 gody i dal'neyshuyu perspektivu [Conceptual views on the development of domestic weapons and equipment for the 2030 and future perspective], *Sbornik materialov konferentsii «Perspektivy razvitiya bronetankogo vooruzheniya do 2030 goda»* [proceedings of the conference "prospects of development of bronetancovogo weapons by 2030"]. Kubinka, 2015, pp. 4-32.
2. *Bryullov O.N.* Tanki [Tanks]. Moscow: ООО изд-во «Планета», 2015, 564 p.
3. *Belyakov V.V. i dr.* Vezdekhodnye transportno-tekhnologicheskie mashiny [All-terrain transport-technological machines]. Nizhniy Novgorod: Izd-vo «Talam», 2004, 960 p.
4. *Nikitin A.O., Sergeev L.V.* Teoriya tanka [The theory of the tank]. Moscow: Izd-vo ABTV, 1962, 583 p.

5. *Vasil'chenkov V.F. i dr.* Voennye avtomobili [Military vehicles]. Rybinsk: OAO «Rybinskiy dom pečati», 1976, 659 p.
6. *Chobitok V.A.* Teoriya dvizheniya tankov i BMP [The theory of the movement of tanks and infantry fighting vehicles]. Moscow: Vosnizdat, 1984, 264 p.
7. Teoriya i konstruktsiya tanka [Theory and design of the tank]. Vol. I. Osnovy sistemy upravleniya razvitiem voennykh gusenichnykh mashin [Basis of the system of management of development of military goose-ary machines], ed. by Isakova Ya.Ya. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 212 p.
8. Teoriya i konstruktsiya tanka [Theory and design of the tank]. Vol. 8. Parametry vneshney sredy, ispol'zuemye v raschetakh tankov [The external environment parameters used in the calculations of tanks], ed. by Isakova Ya.Ya. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 196 p.
9. *Derzhanskiy V.B., Taratorkin I.A.* Algoritmy upravleniya dvizheniem transportnoy mashiny: monografiya [The motion control algorithms of the transport cars: monograph.]. Kurgan: Izd-vo Kurganskogo gos. un-ta, 2010, 142 p.
10. *Nosov N.A., Galyshev V.D., Volkov Yu.I., Kharchenko A.I.* Raschet i konstruirovaniye gusenichnykh mashin [Calculation and design of tracked vehicles]. Leningrad: Mashinostroenie, 1972, 360 p.
11. *Savochkin V.A., Dmitriev A.A.* Statisticheskaya dinamika transportnykh i tyagovykh gusenichnykh mashin [Statistical dynamics of transport and traction tracked vehicles]. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 320 p.
12. *Karpov E.K.* Povysheniye podvizhnosti bystrokhodnoy gusenichnoy mashiny na osnove pereraspredeleniya vo vremeni upravlyayushchikh silovykh vozdeystviy: diss. ... kand. tekhn. nauk [Increased mobility of high-speed tracked vehicles on the basis of the redistribution in time of the governing force effects. Specialty 05.05.03 "Wheeled and tracked vehicles". Cand. of eng. sc, diss.], 2014, 150 p.
13. *Krasnen'kov V.I., Kharitonov S.A.* Dinamika krivolineynogo dvizheniya transportnykh-gusenichnykh mashin [Dynamics of curvilinear motion of vehicle-tracked vehicles], *Trudy MVTU im. N.E. Bauman* [Trudy MVTU im. N.E. Bauman]. Moscow: MVTU, 1984, No. 339, pp. 367-369.
14. Teoriya i konstruktsiya tanka [Theory and design of the tank]. Vol. 10. Book I. *Ispytaniya voennykh gusenichnykh mashin* [Testing of military tracked vehicles], ed. by Isakova Ya.Ya. Moscow: Mashinostroenie. 1989, 232 p.
15. *Chobitok V.A.* Teoriya dvizheniya tankov i BMP [The theory of the movement of tanks and infantry fighting vehicles]. Moscow: Vosnizdat, 1984, 264 p.
16. *Farobin Ya.E.* Teoriya povorota transportnykh mashin [The theory of turning vehicles]. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 176 p.
17. *Shapkin A.N.* Metodika otsenki upravlyaemosti gusenichnykh mashin [Methods of assessing the handling of tracked vehicles], *77-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Avtomobile – traktorostroenie v Rossii»* [77th international scientific and technical conference "Automobile tractor industry in Russia"], pp. 243-252.
18. *Dmitriev A.A., Yagubov V.F., Beketov S.A.* K voprosu ob upravlyaemom dvizhenii gusenichnoy mashiny, TsVNI [To the question about the controlled movement of a caterpillar, ZVNI]. Moscow, 1998. Dep. in TsSIF MO RF 17.09.97; No. V3416.
19. *Yakubov V.F., Shapkin A.N.* Obosnovaniye usloviy poteri upravlyaemosti gusenichnykh mashin pri povorote [Justification for conditions loss of control of tracked vehicles when turning], *77-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Avtomobile – traktorostroenie v Rossii»* [77th international scientific and technical conference "Automobile tractor industry in Russia"], pp. 271-280.
20. *Brilev O.N., Dmitriev A.A. [i dr.].* Otsenka podvizhnosti ob"ektov bronetankovoy tekhniki [Assessment of the mobility of objects of armored vehicles]. Moscow: VA BTV, 1977, 107 p.
21. *Savochkin V.A., Dmitriev A.A.* Teoreticheskie osnovy statisticheskoy dinamiki transportnykh i tyagovykh gusenichnykh mashin [The theoretical basis of the statistical dynamics of transport and traction tracked vehicles]. Moscow: MASHINOSTROENIE, 1993, 320 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.О. Котиев.

Наумов Валерий Николаевич – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; e-mail: makon111@rambler.ru; 105005, г Москва, ул. 2-я Бауманская, 5; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Машков Константин Юрьевич – e-mail: makon111@rambler.ru; к.т.н.; доцент.

Пехтерев Алексей Александрович – e-mail: lexpekhterev@gmail.com; студент.

Рубцов Василий Иванович – e-mail: rubtsov@mail.ru; тел.: 89175791277; к.т.н.; доцент.

Naumov Valery Nikolaevich – Bauman Moscow State Technical University; makon111@rambler.ru; 5, 2nd Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Mashkov Konstantin Urevich – e-mail: makon111@rambler.ru; cand. of eng. sc.; associate professor.

Pehterev Alex Alexandrovich – e-mail: lexpekhterev@gmail.com; student.

Rubtsov Vasily Ivanovich – e-mail: rubtsov@mail.ru; phone: +79175791277; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 629.33.03-83

DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-4254

**М.И. Маленков, А.Н. Богачев, В.А. Волков, Н.К. Гусева, А.Г. Конколович,
Д.Н. Кузьменко, В.М. Курдюк, Е.А. Лазарев, А.Б. Федорушков,
Д.Б. Федорушков**

НОВЫЕ ПРОЕКТНО-КОМПОНОВОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОДВИЖНОСТИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЛАНЕТОХОДОВ*

В статье изложены основные итоги выполнения прикладных исследований по теме «Создание научно-технических решений в области разработки робототехнических систем (РТС) космического назначения для обеспечения напланетных миссий». Главное внимание уделено совершенствованию проектно – компоновочных решений ключевых систем планетоходов нового поколения, определяющих площадь и геоморфологические свойства территорий, доступных для проведения научных исследований, а также эффективность поддержки деятельности человека на поверхности небесных тел. Доступность исследуемых поверхностей Луны и Марса в режимах автономно – автоматического и дистанционного управления прямо зависит от свойств систем передвижения и навигации. На повышение функциональных возможностей РТС также оказывает влияние бортовая манипуляционная система. В качестве лучших образцов для сравнительной оценки научно – технического уровня новых технических решений, выбраны действующие американские марсоходы «Opportunity» и «Curiosity», демонстрирующие высокие эксплуатационные характеристики, в частности, по ресурсу работы, качеству и надежности бортовых систем. Однако в части проходимости, свойства марсоходов далеки от оптимальных характеристик. Есть резервы и для существенного повышения подвижности, обобщенным параметром которой является время, затраченное на передислокацию из одного обследованного района в другой. Повышение подвижности связано не только с проходимостью, но требует также равенности прямого хода и реверса по качеству решения навигационных задач. Требуется непрерывный контроль пройденного пути и коэффициента буксования колес, применение контактных методов определения прочности грунта по трассе движения. Итогом исследований стала разработка, на основе отечественного научно – технического задела, проектных решений в виде 3D модели РТС «Помощник космонавта».

Система передвижения; навигация; техническое зрение; манипуляционная система, колесно-шагающий движитель, активная подвеска, механизм шагания, контейнер, планетоходы.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки: проект № 14.576.21.0050, идентификационный номер RFMEFI57614X0050.