

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ ПРИ ЦЕЛЕУКАЗАНИИ В КООРДИНАТАХ GPS

AUTOMATIC CONTROL OF THE MOVEMENT OF THE CATERPILLAR VEHICLE WITH INTELLIGENT HYDROSTATIC TRANSMISSION FOR TARGET DESIGNATION IN GPS COORDINATES

С.В. КОНДАКОВ, д.т.н.
Н.В. ДУБРОВСКИЙ

Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия, tanksv@mail.ru

S.V. KONDAKOV, DSc in Engineering
N.V. DUBROVSKIY

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia,
tanksv@mail.ru

Статья посвящена разработке алгоритма автоматического управления автономным транспортным средством на примере гусеничной машины с бортовой гидростатической трансмиссией. Авторами разработана математическая модель, обладающая научной новизной, получены результаты аналитического решения и физического эксперимента, подтверждающего достоверность модели и работоспособность предложенного алгоритма управления трактором в автоматическом режиме в координатах глобального позиционирования. В модели учтены особенности гидростатического привода, выполненного по бортовой схеме, в том числе механические и объемные потери. Отличительной частью математической модели являются дифференциальные уравнения для промышленного логического контроллера и механизма управления наклонной шайбой аксиально-поршневого регулируемого насоса гидростатической трансмиссии и алгебраические уравнения перевода декартовых координат в координаты глобального позиционирования. Математическая модель реализована в среде программирования VISSIM. Объектом исследования является промышленный трактор ТМ-10 с гидростатической трансмиссией производства завода «ДСТ-Урал» г. Челябинска. Физический эксперимент проведен на опытной модели и показал удовлетворительные результаты. Разработанный алгоритм реализован в среде CoDeSys для промышленного контроллера, управляющего движением серийных тракторов. Расширенная математическая модель позволяет более точно оценить переходные процессы движения в автоматическом режиме. Формирование управляющего воздействия по GPS-координатам открывает новые возможности при решении задачи позиционирования гусеничной машины на открытой местности. Разработанный алгоритм позволяет оценивать время, затраченное на формирование команд микропроцессорными устройствами. Проведенные исследования позволили сформировать новые потребительские свойства промышленному трактору завода «ДСТ-Урал», заключающиеся в появившейся возможности использовании тракторов без оператора в условиях вредных или опасных для человека.

Ключевые слова: автоматическое управление движением, гидростатическая трансмиссия, промышленный контроллер, координаты глобального позиционирования.

The article is devoted to algorithmizing the control of an autonomous vehicle by the example of the caterpillar vehicle with an onboard hydrostatic transmission. The authors developed a mathematical model which has scientific novelty, obtained the results of an analytical solution and a physical experiment that confirmed the reliability of the model and the operability of the proposed algorithm for tractor control in the automatic mode in the global positioning coordinates. The model takes into account the features of the hydrostatic drive, made on-board, including mechanical and volume losses. A characteristic feature of the mathematical model is the differential equations for the industrial logic controller and the control mechanism for the inclined washer of the axial-piston adjustable hydrostatic transmission pump and the algebraic equations for conversion of the Cartesian coordinates to the global positioning coordinates. The mathematical model is implemented in the VISSIM programming environment. The object of the investigation is the industrial tractor TM-10 with hydrostatic transmission which is produced by the plant «DST-Ural» in Chelyabinsk. The physical experiment was carried out on the experimental model and showed satisfactory results. The developed algorithm is implemented in the CoDeSys environment for an industrial controller that controls the movement of production tractors. The extended mathematical model allows to assess more accurately of transient processes of the motion in the automatic mode. The formation of the control action via GPS coordinates provides new possibilities during solving the task of positioning the caterpillar vehicle in the open area. The developed algorithm allows to estimate the time which is spent on the formation of commands by microprocessor devices. The conducted investigations allowed to form new consumer properties to the industrial tractor of the plant «DST-Ural», consisting in the appeared possibility of using tractors without an operator in harmful or dangerous conditions for humans.

Keywords: automatic motion control, hydrostatic transmission, industrial controller, global positioning coordinates.

Введение

В последнее время все большее внимание уделяется вопросам теории и практики использования гидростатических трансмиссий (ГСТ) самоходных гусеничных машин, в том числе на промышленных тракторах [1, 2]. Крупнейшими в мире производителями промышленных тракторов с ГСТ являются «Катерпиллар» (США), «Комацу» (Япония), «Либхер» (Германия), «Шантуй» (Китай), в РФ – завод «ДСТ-Урал» (г. Челябинск).

Испытания ГСТ в составе моторно-трансмиссионной установки (МТУ) гусеничных машин различного назначения проводятся достаточно давно и показали на практике их эффективность [3], особенно для тяжелых гусеничных машин по мере увеличения тягового класса [4]. В связи с этим получает развитие и математическое моделирование процессов работы ГСТ с точки зрения оптимизации их управления [5]. Исследования последних лет связаны с управляемостью транспортных средств человеком и автоматической системой [6], в том числе через автоматизацию ГСТ и создание совершенно новых транспортных платформ, не нуждающихся в постоянном контроле человека.

Главным достоинством ГСТ является возможность плавного изменения передаточного отношения в широком диапазоне частот вращения ведущих колес, которое регулируется за счет изменения подачи насосов и (или) моторов ГСТ. Проведенные исследования применения ГСТ в смежных областях показывают положительный эффект от их внедрения: повышается точность управления в криволинейном режиме, уменьшается вероятность появления заноса, повышается средняя скорость движения [7].

Внедрение в технологические процессы беспилотных транспортных средств является актуальной задачей во многих сферах, где использование традиционного «ручного» управления человеком-оператором либо экономически невыгодно, либо опасно для жизни. В ряде случаев оператора можно заменить радиоуправлением, но в этом случае человек все-таки задействован в работе on-line [8]. Поэтому особый интерес представляют техпроцессы, в которых человека нужно полностью исключить, заменив его автоматической системой управления (АСУ) движением, самостоятельно ориентирующейся в пространстве.

Цель исследования

Имеющиеся результаты моделирования управления гусеничной машиной с ГСТ позволили сформулировать цель настоящего исследования: разработать алгоритм автоматического управления гусеничной машиной с ГСТ при указании движущейся машине цели на местности в координатах глобального позиционирования в произвольный момент времени.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- ввести в математическую модель дополнительно линейные уравнения пересчета систем координат и дифференциальные уравнения для программируемого логического контроллера (ПЛК) и механизма управления наклонной шайбой ГСТ;

- отработать алгоритм управления движением платформы путем имитационного моделирования в автоматическом режиме при указании цели в координатах GPS в произвольный момент времени.

Математическая модель объекта управления

Объектом математического моделирования является гусеничная машина с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) и ГСТ, выполненной по бортовой схеме. Прототипом является промышленный трактор класса 15 производства завода «ДСТ-Урал» [9].

В стандартной модификации промышленный бульдозер управляется джойстиком, на который воздействует человек-оператор. Джойстик, являясь потенциометром, отправляет электрический сигнал на промышленный логический контроллер (ПЛК), который вырабатывает токовый сигнал для электромагнита, расположенного внутри корпуса ГСТ. В зависимости от величины этого сигнала электромагнит изменяет положение наклонной шайбы насоса ГСТ, регулируя скорость выходного вала ведущего колеса.

Структурная схема МТУ представлена на рис. 1. МТУ состоит из ДВС, который передает вращение на ГСТ, состоящую из двух насосов и двух моторов, которые вращают ведущие колеса через бортовой редуктор (БР), ПЛК и блока формирования управляющих сигналов (БФУС).

В основу работы положена математическая модель (ММ), состоящая из уравнений кинематики движения гусеничной машины, уравнений для МТУ, уравнения для давлений в магистрях всасывания и нагнетания ГСТ [10, 11].

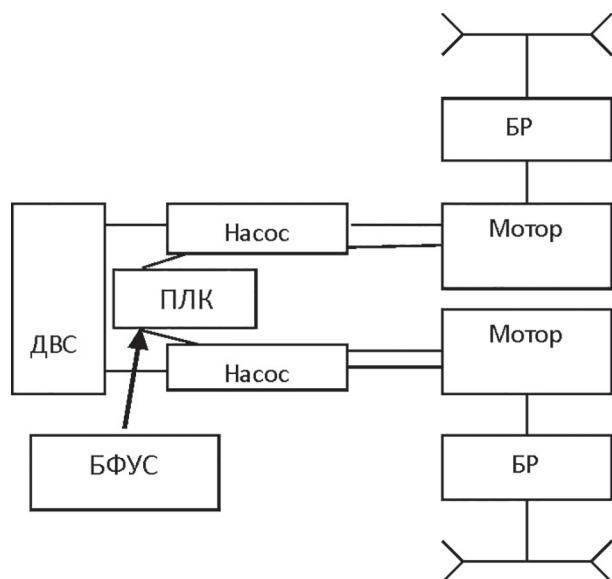


Рис. 1. Структурная схема МТУ

Первая часть ММ представляет собой систему трех дифференциальных уравнений (1) криволинейного движения гусеничной машины в форме уравнений Лагранжа второго рода:

$$\frac{d^2 X_c}{dt^2} = \left[(P_2 + P_1 - Pf_1 - Pf_2) \sin \varphi + R_6 \cos \varphi \right] \frac{g}{G};$$

$$\frac{d^2 Y_c}{dt^2} = \left[(P_2 + P_1 - Pf_1 - Pf_2) \cos \varphi + R_6 \sin \varphi \right] \frac{g}{G}; \quad (1)$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \left[(P_2 - P_1 + Pf_1 - Pf_2) \frac{B}{2} - \text{sign} \frac{d\varphi}{dt} M_c \right] \frac{1}{J_c},$$

где t – текущее время, с; X_c – координаты центра тяжести платформы; φ – курсовой угол; P_1, P_2 – силы тяги на левом и правом бортах; $P_1 f, P_2 f$ – сопротивление передвижению на левом и правом бортах; R_6 – боковая сила сопротивления; M_c – момент сопротивления повороту; G – вес платформы; J_c – момент инерции платформы относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести; g – ускорение свободного падения.

МТУ имеет три степени свободы и описано тремя дифференциальными уравнениями первого порядка (2):

$$\frac{d\omega_d}{dt} = \left[M_d - M_{n1} - M_{n2} \right] \frac{1}{J_1};$$

$$\frac{d\omega_{m1}}{dt} = \left[M_{m1} - \frac{(P_1 + P_2) R_{BK} k}{i_{6p} i_5 (k+1)} \right] \frac{1}{J_2}; \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_{m2}}{dt} = \left[M_{m2} - \frac{(P_2 - P_1) R_{BK}}{i_{6p} i_5 (k+1)} \right] \frac{1}{J_3}.$$

где $\omega_d, \omega_{m1}, \omega_{dм2}$ – угловые скорости валов ДВС и моторов ГОП; M_d, M_{n1}, M_{n2} – крутящие моменты на валах ДВС и насосов гидрообъемных передач (ГОП); M_{m1}, M_{m2} – моменты на моторах ГОП; R_{BK} – радиус ведущего колеса; i_{6p} – передаточное число бортового редуктора; J_1, J_2, J_3 – моменты инерции соответствующих масс.

ГСТ описана уравнениями для давления в каждой из магистралей:

$$\frac{dP_{11}}{dt} = [Q_{n1} - Q_{m1} - Q_{k11} + Q_{k12} + Q_{kpp11} - \Delta Q_{n11} - \Delta Q_{m11}] \frac{E}{V_1};$$

$$\frac{dP_{12}}{dt} = [Q_{m1} - Q_{n1} + Q_{k11} - Q_{k12} + Q_{kpp12} - \Delta Q_{n12} - \Delta Q_{m12}] \frac{E}{V_2};$$

$$\frac{dP_{22}}{dt} = [Q_{m2} - Q_{n2} + Q_{k22} - Q_{k22} + Q_{kpp22} - \Delta Q_{n22} - \Delta Q_{m22}] \frac{E}{V_2};$$

$$\frac{dP_{21}}{dt} = [Q_{n2} - Q_{m2} - Q_{k21} + Q_{k21} + Q_{kpp21} - \Delta Q_{n21} - \Delta Q_{m21}] \frac{E}{V_1},$$

где P_{11}, P_{12} – давления в магистральных первой ГОП; P_{21}, P_{22} – давления в магистральных второй ГОП; Q_{n1}, Q_{m1} – расходы насоса и мотора первой ГОП; Q_{n2}, Q_{m2} – расходы насоса и мотора второй ГОП; $Q_{k11}, Q_{k12}, Q_{k21}, Q_{k22}$ – расходы предохранительных клапанов; $Q_{kpp11}, Q_{kpp12}, Q_{kpp21}, Q_{kpp22}$ – расходы клапанов подпитки; ΔQ_n и ΔQ_m – утечки в насосах и моторах.

Каждая из магистралей ГОП может быть высокого или низкого давления в зависимости от условий движения (вперед – назад, поворот вправо – влево, переходные процессы движения: разгон – торможение, вход – выход из поворота). Стоит оговорить, что при решении данной задачи момент сопротивления повороту гусеничной машины рассчитывался по А.О. Никитину [12–14], тем более, что смещение полюса поворота не превышает пяти сантиметров, что для промышленного бульдозера является пренебрежимо малой величиной. Научная новизна работы состоит во введении в ММ следующих уравнений:

$$UH(t) = UH_2(t) - 15 \Delta I(t) e^{-10t};$$

$$\Delta I(t) = 8 \cdot 10^5 \Delta \varphi(t) e^{-8 \cdot 10^5 t};$$

$$\Delta\varphi(t) = \varphi(t) - \varphi_{ц}(t);$$

$$\varphi_{ц}(t) = \arctg \left[\frac{x_{ц} - x(t)}{y_{ц} - y(t)} \right],$$

где $UH(t)$ – относительный угол отклонения наклонной шайбы правого (отстающего) борта; $UH_2(t)$ – относительный угол отклонения наклонной шайбы левого (забегающего) борта; $\Delta I(t)$ – значение силы тока на выходе (ПЛК); $\Delta\varphi(t)$ – разница между действительным курсовым углом и углом на цель; $\varphi_{ц}(t)$ – угол направления на цель в декартовых координатах; $x_{ц}, y_{ц}$ – координаты цели в декартовой системе координат.

Введенные уравнения позволяют включить в ранее существующую модель влияние инерционности устройства управления электромагнитом и ПЛК, а также сформировать управляющее воздействие.

Математическая модель реализована в среде программирования VISSIM. В программе создана блок-схема формирования управляющего воздействия после получения целеуказания в GPS-координатах и их преобразования.

Для преобразования GPS-координат в декартовы координаты местности получена схема (рис. 2) преобразования координат

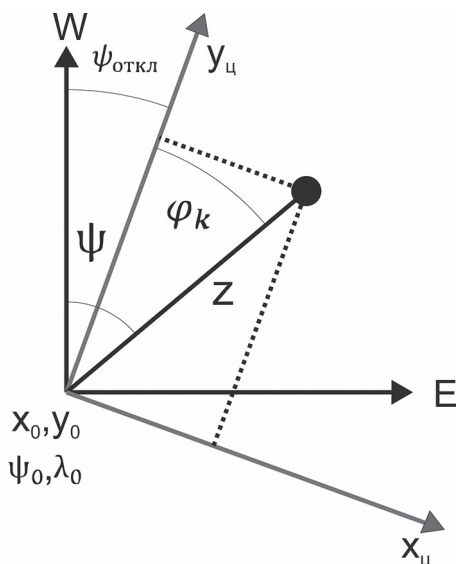


Рис. 2. Схема преобразования координат

Основываясь на рис. 2, составлена система тригонометрических уравнений для выполнения пересчета из координат GPS в принятую в модели декартову систему:

$$\psi_{ц} = \psi_0 + \frac{Z \cos(\varphi_k + \psi_{откл})}{R};$$

$$\lambda_{ц} = \lambda_0 + \frac{Z \sin(\varphi_k + \psi_{откл})}{R \cos(\psi_0)},$$

где ψ_0, λ_0 – координаты широты и долготы, соответствующие начальному положению объекта, полученные со спутников; $\psi_{ц}, \lambda_{ц}$ – координаты широты и долготы цели; Z – радиус-вектор, проведенный из начала декартовых координат в точку цели; φ_k – угол между осью Y и радиус-вектором Z ; $\psi_{откл}$ – угол отклонения оси Y от направления на север.

Решая систему тригонометрических уравнений, найдем:

$$\varphi_k = \arctg \left[\frac{(\lambda_{ц} - \lambda_0) \cos(\psi_0)}{(\psi_{ц} - \psi_0)} \right] - \psi_{откл}.$$

Зная φ_k , определим Z :

$$Z = \frac{R(\psi_{ц} - \psi_0)}{\cos(\varphi_k + \psi_{откл})}.$$

Определим координаты цели в декартовой системе координат:

$$X_c = Z \sin(\varphi_k);$$

$$Y_c = Z \cos(\varphi_k).$$

При моделировании в среде программирования VISSIM заданы GPS-координаты начала движения и координаты цели в формате десятичных градусов. Данный формат координат выбран исходя из соображений облегчения пересчета, ускорения выполнения процессов на ПЛК.

Проведено имитационное моделирование движения платформы по карте, составленной компанией Google, на территории предприятия ООО «ДСТ Урал», оно соответствует зоне, безопасной для проведения испытаний.

Имитационное моделирование

Начальные условия и принятые допущения.

Начальное положение в декартовых координатах: $(x, y, \varphi) = \{0\}$ Начальная линейная скорость: $(V_x, V_y) = (0; 1)$. Угол отклонения от севера $\psi_{откл}$ равен 25 град. Начальное положение в GPS координатах: $(\psi_0; \lambda_0) = 55,21743039; 61,43938847$. GPS координаты цели: $(\psi_{ц}; \lambda_{ц}) = 55,21745487; 61,43939856$. Моделируемый момент времени получения целеуказания – 5 с.

Изначально, объект движется прямолинейно, далее моделируется получение объектом целеуказания в момент времени, равный пятой секунде работы. Также в программу заложен

алгоритм остановки движения при достижении координат цели с погрешностью 0,1 м. На двадцатой секунде моделируется изменение структуры грунта под объектом для проверки неизменности кинематических параметров.

Объект выставлен таким образом, что ось Y при старте отклонена от направления на север на 25 град. В момент начала моделирования объект движется прямолинейно с постоянной скоростью. Момент формирования цели и изменение курсового угла представлены на рис. 3. На 20-й секунде имитируется изменение структуры грунта.

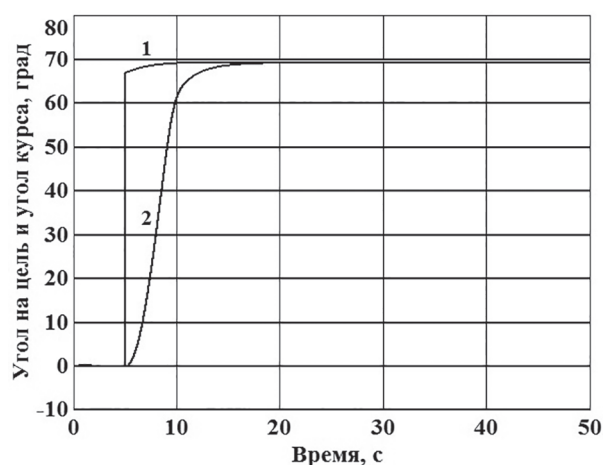


Рис. 3. Изменение угла на цель 1 и курсового угла 2 во времени

Изменение угла курса и появление целеуказания незамедлительно вызывают изменение силы тока, вырабатываемой программируемым логическим контроллером, которая в момент целеуказания вырабатывает необходимый токовый сигнал. Изменение силы тока вызывает изменение магнитного потока в катушке электромагнита, следовательно наклонная шайба отклоняется.

Для обеспечения прямолинейного движения необходимо, чтобы ведущие колеса вращались с одинаковой скоростью. Это достигается тем, что наклонные шайбы левого и правого бортов находятся в одинаковых граничных положениях. При наступлении момента целеуказания контроллер вырабатывает сигнал, необходимый для разворота наклонной шайбы ГОП правого (отстающего) борта в противоположную сторону на 76 %, и постепенно, по мере совершения маневра возвращает ее в первоначальное положение.

При изменении положения наклонной шайбы в магистралях нагнетания насосов ГСТ создаются разные давления, следствием чего являются разные угловые скорости ведущих колес левого и правого бортов (рис. 4)

Изменение скоростей вращения ВК вызывает появление буксования σ , следовательно для поддержания постоянной скорости увеличивается сила тяги (рис. 5).

Также изменение тяги в совокупности с изменением угла курса вызывают изменение линейных ускорений и скоростей, вследствие чего изменяются координаты положения гусеничной платформы (рис. 6). Из рисунка видно, что объект первоначально движется прямолинейно и изменяет свою траекторию движения в сторону цели, которая указана на 5-й секунде

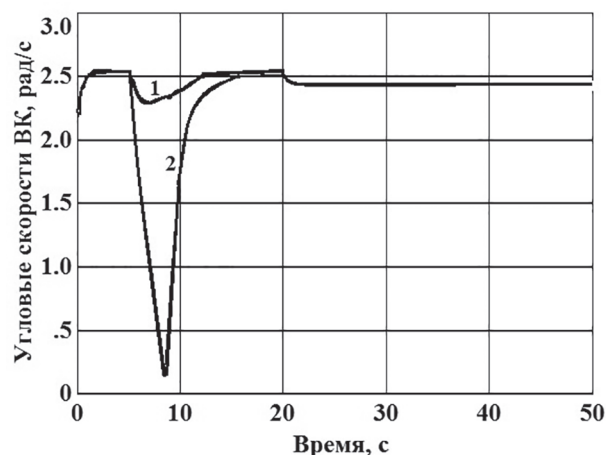


Рис. 4. Угловые скорости ведущих колес левого 1 и правого 2 бортов

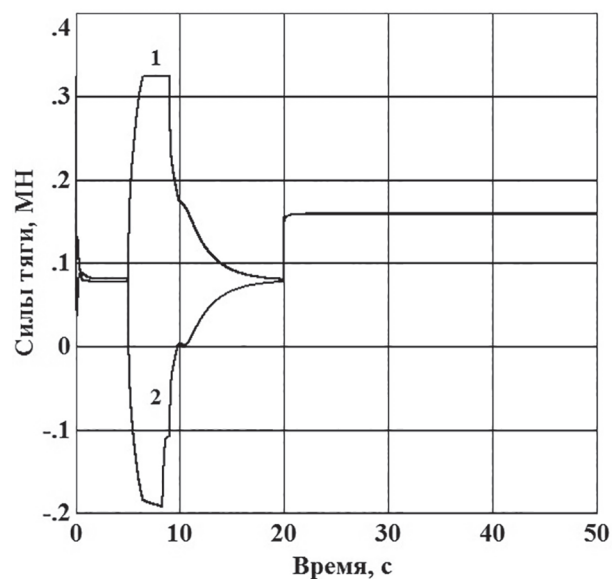


Рис. 5. Силы тяги левого 1 и правого 2 бортов

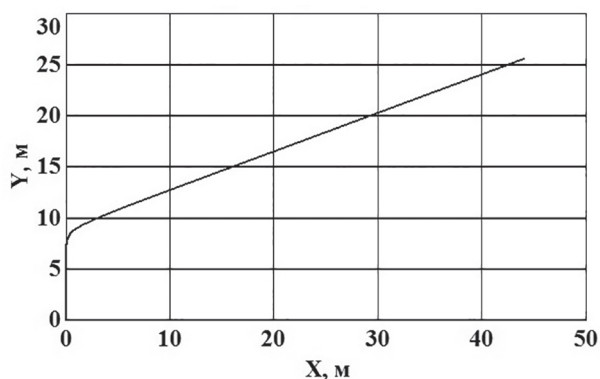


Рис. 6. Траектория движения в декартовых координатах

движения. Из-за инерционности объекта разворот на точку цели произошел не мгновенно, а по некоторому радиусу.

При изменении траектории движения начинает действовать обратная связь, которая вызывает изменение силы тока, вырабатываемой контроллером.

Выводы

1. Расширенная математическая модель позволяет более точно оценить переходные процессы движения в автоматическом режиме.

2. Формирование управляющего воздействия по GPS-координатам открывает новые возможности при решении задачи позиционирования гусеничной машины на открытой местности.

3. Разработанный алгоритм позволяет оценивать время, затраченное на формирование команд микропроцессорными устройствами.

Литература

1. Karl Th. Renius, Rainer Resch. 2005. Continuously Variable Tractor Transmissions // ASAE Distinguished Lecture. No. 29. PP. 1–37.
2. Гинзбург Ю.В., Швед А.И., Парфенов А.П. Промышленные тракторы. М.: Машиностроение, 1986. 296 с.
3. Installation and test of hydrostatic drive transmission in a government furnished M-113 vehicles. David Taylor Research Center. Monitoring organization report number DTRC-SSID-CR-6-89. Режим доступа: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a204960.pdf> (дата обращения 23.06.2017).
4. Karl-Erik Rydberg. 1997. Hydrostatic Drives in Heavy Mobil Machinery – New Concept and Development Trends. Linköping University // SAE paper. No. 981989.

5. Ali Volkan Akkaya. 2006. Effect of bulk modulus on performance of a hydrostatic transmission control system. Yildiz Technical University, Turkey. Sadhana. Vol. 31. Part 5. October 2006. Pp. 543–556.
6. Iliyan Lilov, Lalyo Lalev. 2006. Mathematical Modeling of Processes in the System Environment-Driver-Caterpillar Vehicle for Motion on Rout with Changeable Structure. Режим доступа: http://www.actrus.ro/reviste/3_2006_eng/a15.pdf (дата обращения 28.06.17).
7. Кондаков С.В. Исследование подвижности быстроходной гусеничной машины при движении по заданной трассе // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2010. Вып. 15. № 10 (186). С. 63–66.
8. Кондаков С.В., Корнаева Н.Н., Павловская О.О., Черепанов С.И. Имитационное моделирование движения быстроходной гусеничной машины с механиком-водителем // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Машиностроение». 2010. № 29 (205). С. 59–64.
9. БУЛЬДОЗЕР TM10.11 ГСТ10. Режим доступа: http://kemkran-dst.ru/dst/tm10_11gst10.php (дата обращения 20.06.17).
10. Кондаков С.В. Обеспечение управляемости быстроходных гусеничных машин на переходных режимах криволинейного движения. Челябинск: ЮУрГУ, 2006. 92 с.
11. Кондаков, С.В., Павловская, О.О. Автоматизированное управление движением быстроходной гусеничной машины. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 105 с.
12. Никитин А.О. Теория танка. М.: Издание Академии бронетанковых войск. 1962. 584 с.
13. Кондаков С.В., Харлапанов Д.В., Вансович Е.И. Достоверность моделей описания сопротивления повороту быстроходной гусеничной машины // Вестник машиностроения. 2015. № 10. С. 3–7.
14. Kondakov S.V., Kharlapanov D.V., Vansovich E.I. Models of the Turn Resistance for High-Speed Caterpillar Vehicles // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. No. 1. PP. 1–5.

References

1. Karl Th. Renius, Rainer Resch. 2005. Continuously Variable Tractor Transmissions. ASAE Distinguished Lecture. No. 29. RR. 1–37.
2. Ginzburg Yu.V., Shved A.I., Parfenov A.P. Promyshlennyye traktory [Industrial tractors]. Moscow: Mashinostoenie Publ., 1986. 296 p.
3. Installation and test of hydrostatic drive transmission in a government furnished M-113 vehicles. David Taylor Research Center. Monitoring organization report number DTRC-SSID-CR-6-89. URL:

- http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a204960.pdf (accessed: 23.06.2017).
4. Karl-Erik Rydberg. 1997. Hydrostatic Drives in Heavy Mobil Machinery – New Concept and Development Trends. Linkoping University. SAE paper. No. 981989.
5. Ali Volkan Akkaya. 2006. Effect of bulk modulus on performance of a hydrostatic transmission control system. Yildiz Technical University, Turkey. Sadhana. Vol. 31. Part 5. October 2006. RR. 543–556.
6. Iliyan Lilov, Lalyo Lalev. 2006. Mathematical Modeling of Processes in the System Environment-Driver-Caterpillar Vehicle for Motion on Rout with Changeable Structure. URL: http://www.actrus.ro/reviste/3_2006_eng/a15.pdf (accessed: 28.06.17).
7. Kondakov S.V. Investigation of the mobility of the high-speed caterpillar vehicle during driving along a given path. Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie». 2010. Vyp. 15. No 10 (186), pp. 63–66 (in Russ.).
8. Kondakov S.V., Kornaeva N.N., Pavlovskaya O.O., Cherepanov S.I. Simulation modeling of the movement of the high-speed caterpillar vehicle with a driver-mechanic. Vestnik YuUrGU. Seriya: «Mashinostroenie». 2010. No 29 (205), pp. 59–64 (in Russ.).
9. BUL”DOZER TM10.11 GST10 (in Russ.). URL: http://kcmkran-dst.ru/dst/tm10_11gst10.php (accessed: 20.06.17).
10. Kondakov S.V. Obespechenie upravlyaemosti bystrokhodnykh gusenichnykh mashin na perekhodnykh rezhimakh krivolineynogo dvizheniya [Providing steerability of the high-speed caterpillar vehicles in transient modes of curvilinear motion]. Chelyabinsk: YuUrGU Publ., 2006. 92 p.
11. Kondakov, S.V., Pavlovskaya, O.O. Avtomatizirovannoe upravlenie dvizheniem bystrokhodnoy gusenichnoy mashiny [Automated control of the movement of the high-speed caterpillar vehicle]. Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 105 p.
12. Nikitin A.O. Teoriya tanka [Theory of the tank]. Moscow: Izdanie Akademii bronetankovykh voysk Publ.. 1962. 584 p.
13. Kondakov S.V., Kharlapanov D.V., Vansovich E.I. Reliability of models describing the resistance of the turn of the high-speed caterpillar vehicle. Vestnik mashinostroeniya. 2015. No 10, pp. 3–7 (in Russ.).
14. Kondakov S.V., Kharlapanov D.V., Vansovich E.I. Models of the Turn Resistance for High-Speed Caterpillar Vehicles. Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. No. 1. RR. 1–5.