

УДК 629.3.021

DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-12-68-75

С.В. Кондаков, А.А. Дьяконов, О.О. Павловская, И.А. Подживотова

## АЛГОРИТМ РАБОТЫ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ТРАКТОРА С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ ПОВОРОТА

Выработан алгоритм работы следящей системы управления движением промышленного трактора на основе информации об угловой скорости поворота и курсовом угле, что позволило достичь заданных показателей точности выполнения маневра. Приведено теоретическое обоснование полученного в математическом эксперименте ре-

зультата - управления движением по кривизне траектории с поправкой на курсовой угол, то есть введения инвариантной связи по эталону.

**Ключевые слова:** следящая система управления, ССУ, промышленный трактор, дифференциальный механизм поворота, инвариантная связь, гидрообъемная передача, передаточная функция.

S.V. Kondakov, A.A. Diyakonov, O.O. Pavlovskaya, I.A. Podzhivotova

## ALGORITHM OF FOLLOW-UP CONTROL SYSTEM WORK FOR RECTILINEAR MOTION STABILIZATION OF INDUSTRIAL TRACTOR WITH DIFFERENTIAL ROTATION GEAR

The paper is dedicated to the rectilinear motion stability of an industrial caterpillar equipped with a follow-up control system (FCS). The FCS task: to ensure a rectilinear motion at the occurrence of barriers such as a hindrance under one of the tracks, heterogeneity of soil and so on. For the successful realization of the task set it is necessary to substantiate a criterion basis of the FCS. The necessity and possibility of control a tractor with a differential rotation gear and a follow-up system on two parameters – on an angular ve-

locity or a relative bearing (depending on technological tasks of a tractor). There is shown a theoretical substantiation of the result obtained in the course of the mathematical experiment – motion control along a path curvature with the correction for the relative bearing, that is, the introduction of an invariant tie based on a standard.

**Key words:** follow-up control system, FCS, industrial tractor, differential rotation gear, invariant tie, hydraulic volume transmission, transfer function.

На траекторию движения трактора в прямолинейном направлении часто оказывают влияние возникающие помехи: камень, попавший под одну из гусениц, смена грунта под одной из гусениц, неравномерность загрузки отвала бульдозера и пр. Это приводит к самопроизвольному изменению курсового угла, заданного джойстиком управления.

Известные конструкции трансмиссий и механизмов поворота гусеничных машин позволяют по-разному решить проблему увода при прямолинейном движении [1-6].

Дифференциальный механизм поворота, реализованный в опытном образце промышленного трактора класса тяги 10 т, позволяет компенсировать увод трактора от прямолинейного движения дополни-

тельным регулированием гидрообъемной передачи (ГОП), работающей в составе дифференциального механизма поворота (МП).

Для отработки алгоритма работы следящей системы управления (ССУ) моделирована математическая модель движения гусеничного промышленного трактора в части введения обратной связи, обеспечивающей независимое от водителя дополнительное воздействие на наклонную шайбу насоса ГОП.

Математическая модель, положенная в основу исследований следящей системы управления промышленного трактора, состоит из 8 дифференциальных уравнений первого и второго порядка. Шесть уравнений описывают движение корпуса маши-

ны, вращение валов двигателя и мотора ГОП, турбины гидротрансформатора (ГТ);

два уравнения описывают давления в магистрях ГОП [7-9] :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 X_c}{dT^2} &= [(T_{x2} + T_{x1} - F_1 - F_2) \sin \varphi + (T_{y2} + T_{y1}) \cos \varphi] \frac{g}{G}; \\ \frac{d^2 Y_c}{dT^2} &= [(T_{x2} + T_{x1} - F_1 - F_2) \cos \varphi - (T_{y2} + T_{y1}) \sin \varphi] \frac{g}{G}; \\ \frac{d^2 \varphi}{dT^2} &= \left[ (T_{x2} - T_{x1} + F_1 - F_2) \frac{B}{2} - \left( \text{sign} \frac{d\varphi}{dT} \right) (M_{T1} + M_{T2}) \right] \frac{1}{J_c}; \\ \frac{d\omega_n}{dT} &= [M_{\partial i_1} - M_n - M_{zn i_2}] \frac{1}{J_1}; \\ \frac{d\omega_m}{dT} &= \left[ M_m - \frac{(T_{x2} + T_{x1}) R_{\theta K} (K + 1)}{i_{\partial n} i_K K} \right] \frac{1}{J_2}; \\ \frac{d\omega_M}{dT} &= \left[ M_{zM} - \frac{(T_{x2} - T_{x1}) R_{\theta K}}{i_{\partial n} i_5 K} \right] \frac{1}{J_3}; \\ \frac{dP_{zon1}}{dT} + \frac{P_{zon1}}{T_M} &= (Q_{n1} - Q_{m1} - Q_{k11} - Q_{k21} + Q_{k31} - Q_{k41}) \frac{E}{V_1}; \\ \frac{dP_{zon2}}{dT} + \frac{P_{zon2}}{T_M} &= (Q_{m2} - Q_{n2} - Q_{k12} - Q_{k22} + Q_{k32} - Q_{k42}) \frac{E}{V_2}. \end{aligned}$$

Кроме того, в математическую модель входит ряд уравнений связи, подробно представленных в работах [7-9].

В свое время в работе [10] из нескольких вариантов контролируемых величин (угловое ускорение, угловая скорость, курсовой угол) в качестве величины, по которой организуется управление криволинейным движением быстроходной машины, была рекомендована угловая скорость поворота машины, которая напрямую характеризует кривизну траек-

тории. Однако подобный подход к решению задачи стабилизации прямолинейного движения машины оказался неэффективным, что подтвердили результаты имитационного моделирования.

На рис. 1 приведены структурная схема и передаточная функция регулятора подачи насоса ГОП, реагирующего на отклонение фактической кривизны траектории от заданной, а на рис. 2 - результаты имитационного моделирования.

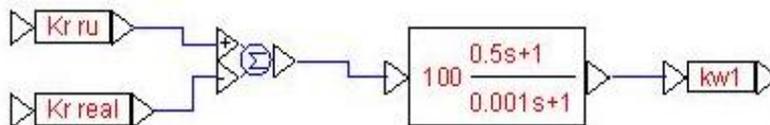


Рис. 1. Блок-схема управления только по угловой скорости поворота

Графики на рис. 2 различаются величиной коэффициента усиления регулятора. Очевидно, что увеличение коэффициента усиления, как один из методов повышения точности системы управления, существенно уменьшает отклонение фактической

кривизны траектории трактора от заданной (увод трактора), но не сводит ошибку к нулю. Так, увод трактора 0,5...1,5 м при пробеге машины в 50 м не удовлетворяет требованиям к потребительским свойствам.

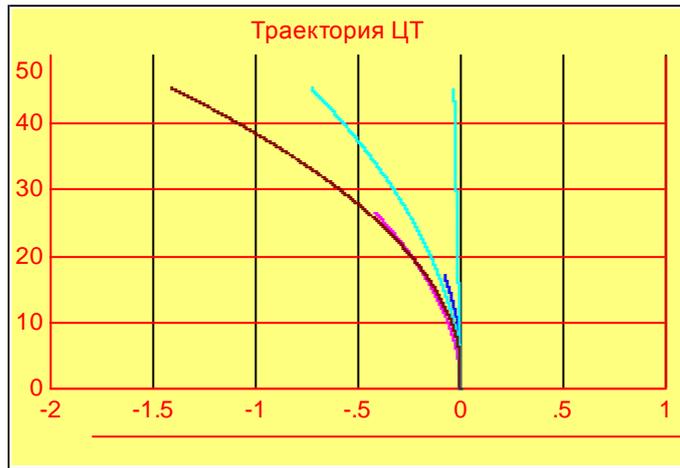


Рис. 2. Траектория движения трактора при управлении по угловой скорости (при коэффициенте усиления 50, 100 и управлении по курсовому углу)

Поэтому авторами принято решение об организации управления по курсовому углу. Регулятор с теми же параметрами, что и на рис. 1, получает исходный сигнал

в виде разности эталонного и реального значений курсового угла.

На рис. 3 представлена структурная схема ССУ по отклонению курсового угла.

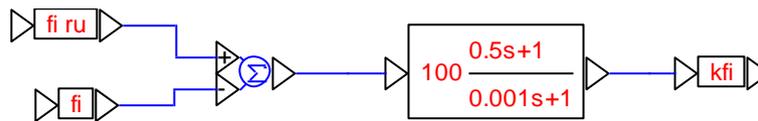


Рис. 3. Блок-схема управления только по отклонению курсового угла

На рис. 2 график, отклоняющийся от оси ординат на 0,02 м за почти 50 м пробега, - это управляемая ССУ по курсовому углу (рис. 3) траектория движения трактора, встретившего под одной из гусениц помеху в виде камня или более плотного грунта.

На рис. 4 приведены графики тяговых усилий по бортам при управлении по курсовому углу. Изменение сопротивления в момент времени  $t=2$  с приводит к изменению тяговых усилий.

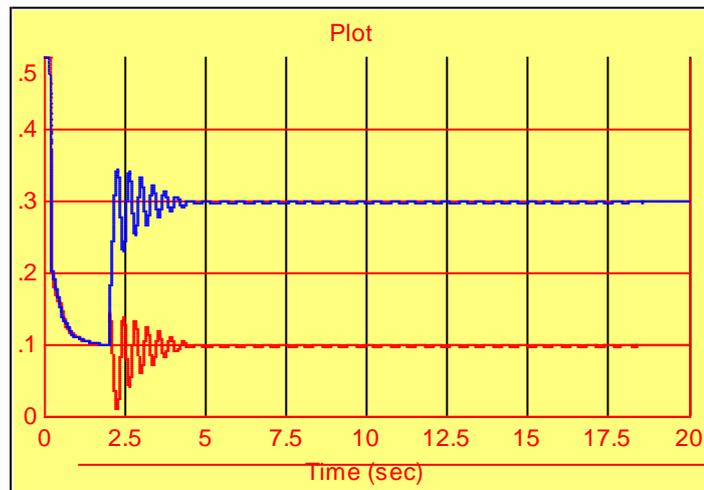


Рис. 4. Силы тяги по бортам при управлении только по курсовому углу

Скорость трактора, как показано на рис. 5, стала ниже, но траектория движе-

ния сохранилась (рис. 2), увод - всего 2 см.



Рис. 5. Скорость движения трактора

В следующем математическом эксперименте управляющий сигнал сформирован с учетом двух параметров: курсового угла и его первой производной – угловой скорости.

На рис. 6 приведена блок-схема ССУ движением трактора при формировании задающего сигнала в виде суммы отклонений от эталона курсового угла и угловой

скорости. Поправка по угловой скорости (кривизне траектории) организована по рис. 1, а по курсовому углу - по рис. 3.

Траектория движения центра тяжести (ЦТ) не изменилась - те же 2 см увода (рис. 2). Однако существенно поменялась картина по тягам: процесс стал ярко выраженным аperiodическим, колебания исчезли (рис. 7).

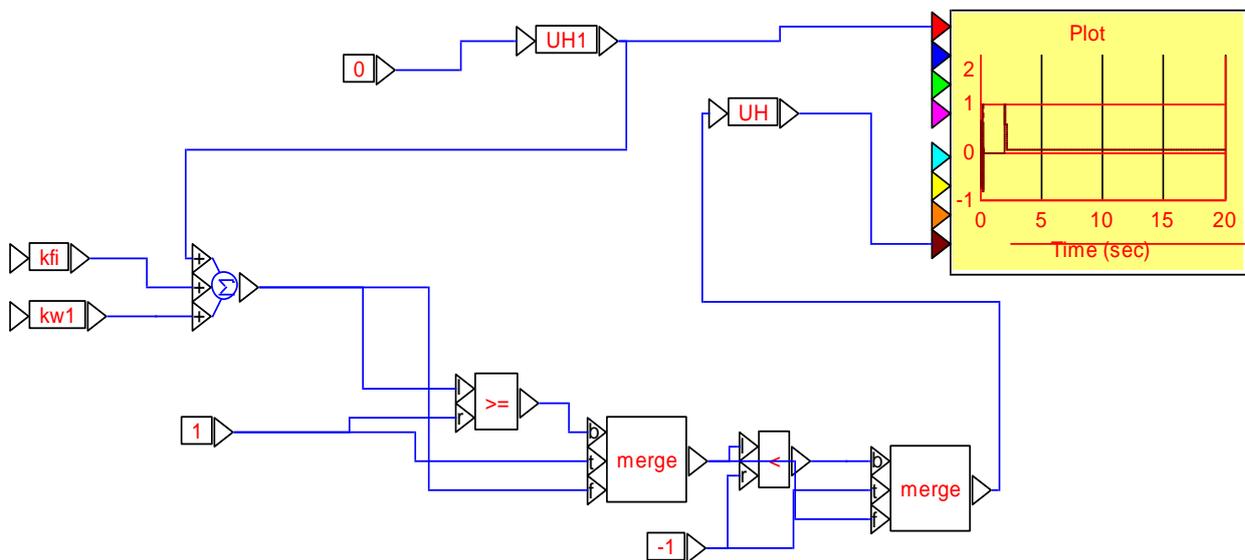


Рис. 6. Блок-схема управления трактором по сумме отклонений угловой скорости и курсового угла



Рис. 7. Силы тяги по бортам при одновременном управлении по отклонению курсового угла и угловой скорости

Возникает вопрос: как организовать переход от одной логики АС к другой - от управления по угловой скорости при криволинейном движении к управлению по курсовому углу при движении по прямой? Кажется бы, этот переход не должен зависеть от водителя. С другой стороны, формировать опорный сигнал по курсовому углу проблематично, ведь угол интегрируется в процессе движения. Он однозначен только при прямолинейном движении.

Известно, что в самолетах автопилот работает на прямолинейных участках полета и включается летчиком. Для совершения маневра с изменением курса летчик берет управление на себя.

По аналогии с вышесказанным и управление трактором со следящей системой может быть организовано по двум алгоритмам: для поддержания заданной кривизны траектории при криволинейном движении - по угловой скорости, для поддержания прямолинейного движения - по курсовому углу.

Теория автоматического регулирования объясняет сложившуюся ситуацию следующим образом.

Авторами опробованы в математическом эксперименте 3 варианта формирования управляющего сигнала:

1. Формирование сигнала с выхода регулятора.

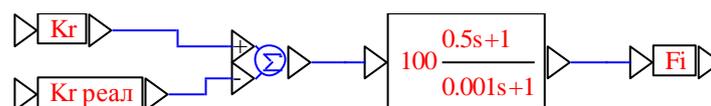


Рис. 8. Блок-схема управления по кривизне (угловой скорости)

Недостатки: 1) статическая ошибка не равна нулю и больше оговоренной в техническом задании ( $\varepsilon_{cm} \geq \varepsilon_{T3}$ ); 2) при управлении прямолинейным движением кривизна  $Kr = 0$ , что эквивалентно ситуации, когда трактор не движется криволи-

нейно (управляющего сигнала нет). Следовательно, путаются два случая: либо объект движется прямолинейно, либо СУ объектом не работает (управляющего сигнала с джойстика нет вообще).

2. Управление по курсовому углу (лишено недостатков прежнего варианта).

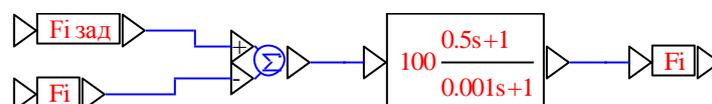


Рис. 9. Блок-схема управления по курсовому углу

Достоинство: коэффициент передачи 100 выбран из условия обеспечения требуемой точности отработки эталонного сигнала.

Недостаток - ограниченные возможности в обеспечении требуемой точности управления в прямолинейном движении: чтобы уменьшить статическую ошибку, нужно увеличить коэффициент передачи,

но при увеличении коэффициента передачи ухудшается качество системы в переходном режиме. Попытка ввести интегрирующую составляющую не решила указанной проблемы.

3. Управление движением по кривизне траектории, но с поправкой на курсовой угол.

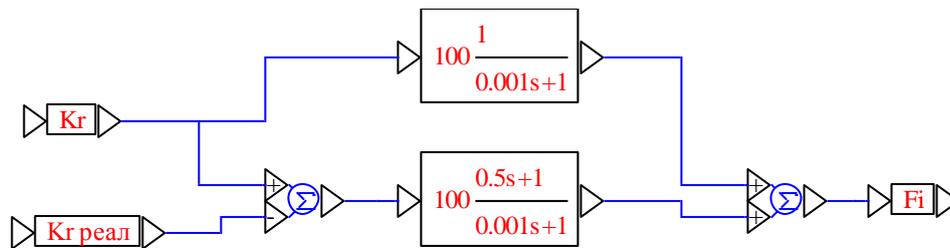


Рис. 10. Блок-схема управления по кривизне с корректировкой по курсовому углу

По сути, введена инвариантная связь по эталону, а это известный прием повышения точности ССУ [11; 12], не влияющий на устойчивость (в отличие от повышения точности за счет повышения коэффициента передачи).

$$W_{\Sigma} = \frac{100(1+0.5s)}{1+0.001s} + \frac{K_1}{s} = \frac{as^2 + bs + c}{s(0.001s + 1)} = as + b + \frac{c}{s}.$$

Таким образом, введение в математическом эксперименте инвариантной связи по кривизне эквивалентно введению в ССУ ПИД-регулятора с тремя настроечными параметрами, за счет чего обеспечена допустимая статическая ошибка и требуемое качество СУ в переходном режиме.

Выводы:

1. Развита математическая модель движения гусеничного промышленного трактора с дифференциальным механизмом поворота и следящей системой управления в части описания прямолинейного движения по неоднородной местности.

2. Установлено, что управление по отклонению угловой скорости поворота в прямолинейном движении не дает удовлетворительного результата. Увод составляет до 2 м на дистанции 100 м.

3. Выдвинута и подтверждена гипотеза о возможности управления движением по отклонению курсового угла. Подобраны коэффициенты ПИД-регулятора. Увод

После структурного преобразования схемы структура приведена к одноконтурному виду (рис. 10). Эквивалентная передаточная функция СУ имеет вид

трактора при этом составил 2 см на 100 м пробега.

4. Отработан алгоритм и определены параметры передаточных функций при управлении одновременно по угловой скорости и курсовому углу. Величина увода не изменилась, но ликвидирована колебательность (перерегулирование) в переходном процессе при смене грунта, которая обнаружена при управлении только по углу.

5. Определены необходимость и возможность управления трактором с дифференциальным механизмом поворота и следящей системой по двум различным алгоритмам - по угловой скорости или курсовому углу (в зависимости от технологических задач трактора).

6. Приведено теоретическое обоснование полученного в математическом эксперименте результата - управления движением по кривизне траектории с поправкой на курсовой угол, то есть введения инвариантной связи по эталону.

*Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Разработка бесступенчатого дифференциального механизма поворота со следящей системой управления для внедорожных и дорожно-строительных машин нового поколения» по соглашению № 074-11-2018-006 от 31.05.2018 г. между Министерством науки и высшего образования РФ и ПК «Ходовые системы» в кооперации с головным исполнителем НИОКТР - Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Объёмные гидромеханические трансмиссии / под ред. Е.С. Кисточкина. Л.: Машиностроение, 1987. 256 с.
2. Петров В.А. Гидрообъёмные трансмиссии транспортных машин. М.: Машиностроение, 1988. 248 с.
3. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1968. 396 с.
4. Исаков П.П. Теория и конструкция. Т. 5. Трансмиссии. Л.: Машиностроение, 1985. 367 с.
5. Гинзбург Ю.В., Швед А.И., Парфенов А.П. Промышленные тракторы. М.: Машиностроение, 1986. 293 с.
6. Злотник М.И., Кавьяров И.С. Трансмиссии современных промышленных тракторов. М.: Машиностроение, 1971. 248 с.
7. 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. P. 1-5.
8. Кондаков С.В., Павловская О.О. Автоматизированное управление движением быстроходной гусеничной машины: монография. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 105 с.
9. Кондаков С.В., Дьяконов А.А., Павловская О.О., Дубровский Н.В. Повышение управляемости криволинейного движения гусеничного трактора путем установки дифференциального механизма поворота и следящей системы // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2018. № 2. С. 23-33.
10. Кондаков С.В. Обеспечение управляемости быстроходных гусеничных машин на переходных режимах криволинейного движения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2001. Вып. 1, № 6. С. 10-15.
11. Красненьков В.И. Основы теории управляемости транспортных гусеничных машин. М.: МВТУ им. Баумана, 1977. 264 с.
12. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления / Изд. 4-е, перераб. и доп. СПб.: Профессия, 2004. 752 с.
1. Volumetric Hydro-mechanical Transmissions / under the editorship of E.S. Kistochkin. L.: Mechanical Engineering, 1987. pp. 256.
2. Petrov V.A. Hydro-volumetric Transmissions of Transport Vehicles. M.: Mechanical Engineering, 1988. pp. 248.
3. Zabavnikov N.A. Fundamentals of Theory of Transport Tracked Vehicles. M.: Mechanical Engineering, 1968. pp. 396.
4. Isakov P.P. Theory and Design. Vol.5. Transmissions. L.: Mechanical Engineering, 1985. pp. 367.
5. Hinsburg Yu.V., Shved A.I., Parfyonov A.P. Industrial Tractors. M.: Mechanical Engineering, 1986. pp. 293.
6. Zlotnik M.I., Kaviyarov I.S. Transmissions of Modern Industrial Tractors. M.: Mechanical Engineering, 1971. pp. 248.
7. 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. P. 1-5.
8. Kondakov S.V., Pavlovskaya O.O. Automated Control of High-Speed Tracked Vehicle Motion: monograph. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. pp. 105.
9. Kondakov S.V., Diyakonov, Pavlovskaya O.O., Dubrovsky N.V. Managing ability increase of caterpillar curvilinear motion through installation of differential rotation gear and follow-up system // Bulletin of SUrSU. Series "Mechanical Engineering". 2018. No.2. pp. 23-33.
10. Kondakov S.V. Managing ability support in high-speed tracked vehicles in transient behaviors of curvilinear motion // Bulletin of SUrSU. Series "Mechanical Engineering". 2001. Edition 1, No.6. pp. 10-15.
11. Krasnenkov V.I. Theory Fundamentals of Transport Tracked Vehicle Managing Ability. M.: Bauman HTC of Moscow, 1977, pp. 264.
12. Besekersky V.A., Popov E.P. Theory of Automated Control Systems / 4-th Edition, revised and supplemented. S-Pb.: Profession, 2004. pp. 752.

*Ссылка для цитирования:*

*Кондаков С.В., Дьяконов А.А., Павловская О.О., Подживотова И.А. Алгоритм работы следящей системы управления для стабилизации прямолинейного движения промышленного трактора с дифференциальным ме-*

ханизмом поворота // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 12. С. 68–75.  
DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-12-68-75.

Статья поступила в редакцию 22.11.19.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного  
технического университета

Кобищанов В.В.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 29. 11. 19.

#### Сведения об авторах:

**Кондаков Сергей Владимирович**, д.т.н., профессор кафедры «Колесные и гусеничные машины» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск, Россия, e-mail: tanksv@mail.ru.

**Дьяконов Александр Анатольевич**, д.т.н., профессор кафедры «Технологии автоматизированного проектирования» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск, Россия, e-mail: diakonovaa@susu.ru.

**Kondakov Sergey Vladimirovich**, Dr. Sc. Tech., Prof of the Dep. “Wheeled and Tracked Vehicles”, South-Urals State University, e-mail: tanksv@mail.ru.

**Diyakonov Alexander Anatolievich**, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. “CAD Technologies”, South-Urals State University, e-mail: diakonovaa@susu.ru.

**Павловская Ольга Олеговна**, к.т.н., доцент кафедры «Системы автоматического управления» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск, Россия, e-mail: olyapav@rambler.ru.

**Подживотова Ирина Александровна**, м.н.с. УНИД Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск, Россия, e-mail: lavina.l@mail.ru.

**Pavlovskaya Olga Olegovna**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Automated Control Systems”, South-Urals State University, e-mail: olyapav@rambler.ru

**Podzhivotova Irina Alexandrovna**, JSW UNID, South-Urals State University, e-mail: lavina.l@mail.ru.