УДК 629.114.2

ПОВЫШЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ ПУТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА

С.В. *Кондаков*

INCREASING OF HIGH-SPEED TRACKED VEHICLE MOBILITY BY AUTOMATION OF ROTARY MECHANISM

S.V. Kondakov

Приведены результаты имитационного моделирования движения машины при автоматизации дополнительного регулирования гидрообъёмного механизма поворота, двигателя и тормозов с целью повышения точности управления поворотом, предотвращения заноса и увеличения средней скорости.

Ключевые слова: быстроходная гусеничная машина, математическая модель, гидрообъемная передача, механизм поворота, кривизна траектории, повышение подвижности, критерий управляемости, алгоритм управления, автоматизация.

The author considers the mobility increasing problem of a high-speed tracked vehicle by automation of hydrostatic drive, vehicle and brakes in order to rise the exactness of turning drive, prevent skidding and increase the average speed.

Keywords: high-speed tracked vehicle, mathematic model, hydrostatic drive, rotary mechanism, curvature of trajectory, mobility increasing, driving criterion, driving algorithm, automation.

Введение. В технической литературе определены физические величины, характеризующие устойчивость и управляемость криволинейного движения быстроходной гусеничной машины [1-4]. Для оценки эффективности управления движением на больших скоростях предложено [5-7] использовать в качестве количественной оценки управляемости относительную разницу кривизны траектории, задаваемой штурвалом и реализуемой на местности. Переход от сравнения частот вращения корпуса, использованного в работах Академии бронетанковых войск [4], к сравнению кривизны траектории движения обеспечивает получение следующих преимуществ: 1 - водитель в процессе управления поворотом следит именно за траекторией движения, а не за угловой частотой вращения корпуса; 2 - для быстроходной гусеничной машины (БГМ) с гидромеханической трансмиссией (ГМТ) и приводом гидрообъемной передачи (ГОП) от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) (Леопард-2, Мардер, БМП-3) кривизна траектории K является более общим критерием, так как включает в себя не только угловую скорость поворота корпуса ω, но и линейную скорость V : $K = \omega/V$. В указанных машинах w и V могут, например, при движении на подъем изменяться независимо друг от друга; 3 - между управляющим воздействием и выходным сигналом помещаются основные искажения процесса (потери ГОП и буксование гусениц).

Количественная оценка управляемости. Одно из важных преимуществ ГОП в механизме поворота - его внешняя автоматичность. В работе [7] впервые предложено установить обратную связь в регулировании положения наклонной шайбы насоса ГОП по критерию разности кривизны траектории, задаваемой штурвалом $K_{шт}$ и реализуемой на местности $K_д$. Кривизна $K_д$ вычисляется как отношение угловой скорости поворота машины в плане, измеряемой гироскопическим датчиком, к продольной теоретической скорости центра тяжести машины, оцененной по частоте вращения выходного вала коробки передач. Структурная схема системы регулирования приведена на рис. 1. Наклонная шайба ГОП соединена со штурвалом дифференциальной связью, позволяющей независимо от водителя подворачивать её на дополнительный угол. Обратная связь организована по правилам теории автоматического регулирования с включением интегрирующего звена:

$$\beta_ш = k_1 \beta_{шт} + k_2 \int (K_{шт} - K_д) dt + k_3 (K_{шт} - K_д),$$

где $\beta_ш$ - относительный угол поворота шайбы насоса ГОП; $\beta_{шт}$ - относительный угол поворота

штурвала управления поворотом; $K_{шт}$ - кривизна траектории по штурвалу; $K_д$ - действительная кривизна траектории центра масс на местности; k_1 , k_2, k_3 - постоянные коэффициенты.

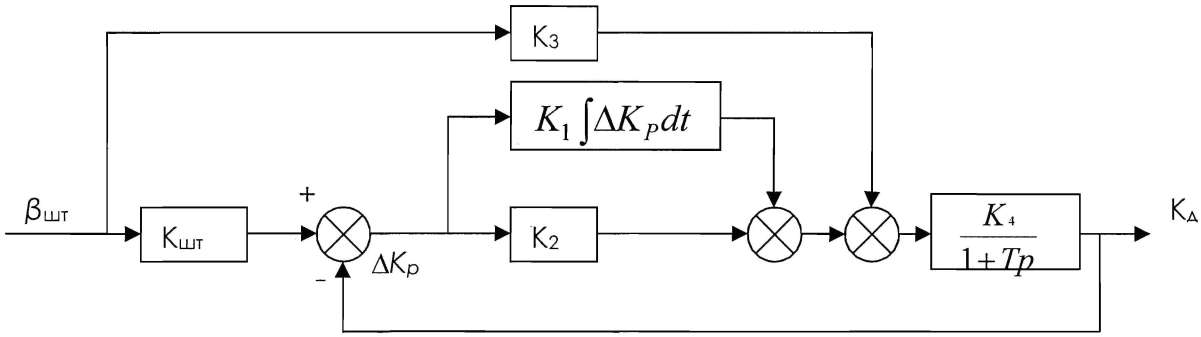

Рис. 1. Структурная схема дополнительного регулирования наклонной шайбы ГОП

В настоящее время теория криволинейного движения гусеничных машин трактует управляемость как качество [2] без количественной оценки. Введение системы дополнительного регулирования насоса ГОП по отклонению кривизны траектории движения машины логично потребовало количественной оценки управляемости:

$$O = \frac{K_{шт} - K_д}{K_{шт}} \cdot 100\%,$$

где О - ошибка управления, %, $K_{шт}$ - кривизна траектории по штурвалу, $K_д$ - кривизна, реализуемая на местности.

Имитационное моделирование движения БГМ в некоторых стандартных условиях показало следующие результаты.

1. Движение по кругу. Радиус траектории становится в полное соответствие штурвалу, без дополнительного регулирования радиус отличался от задаваемого штурвалом в 1 , 5 раза.

2. Изменение грунта «микст». Увеличение сопротивления в 2 раза под отстающей гусеницей (рис. 2) приводит к самопроизвольному уменьшению радиуса поворота на 8 м, изменение грунта под забегающей гусеницей влечет увеличение радиуса на 10 м, а при дополнительном регулировании наклонной шайбы ГОП радиус траектории сохраняется неизменным на любых грунтах.

3. При угрозе заноса дополнительное регулирование наклонной шайбы ГОП (уменьшение подачи вплоть до нуля) позволяет успешно совершить маневр. На рис. 3 кривая показывает, что машина уходит в занос на второй секунде движения, а при дополнительном регулировании ГОП (график 2) удается стабилизировать угол верчения.

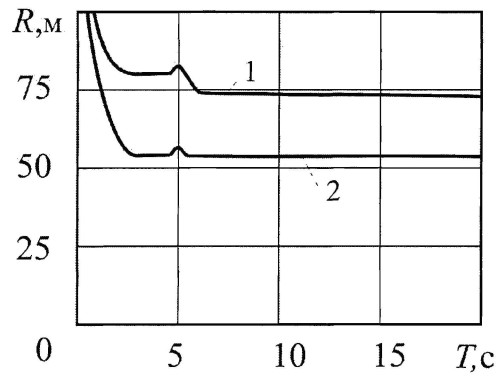

Рис. 2. Зависимость от времени радиуса траектории при входе в поворот и смене грунта под отстающей гусеницей: 1 – без дополнительного управления шайбой ГОП; 2 – с разработанным дополнительным правлением

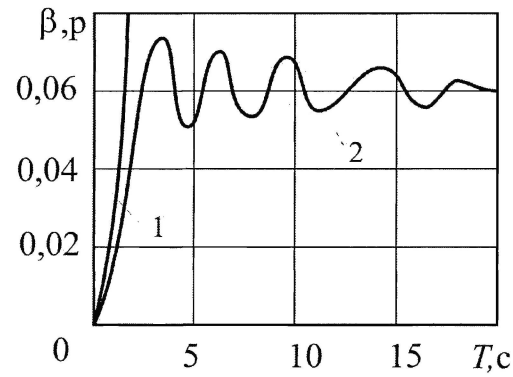

Рис. 3. Зависимость от времени угла β верчения корпуса относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс машины

4. Движение по трассе типа «змейка» и сменой грунта под одной из гусениц в момент времени t=5 с.

Показано, что при регулировании наклонной шайбы ГОП непосредственно от штурвала выходной сигнал (кривизна на местности) отличается от входного сигнала (кривизна, задаваемая штурвалом) на величину ±0,006 $^1/_м$ (рис. 4, график 2). Введение дифференциальной связи в регулирование наклонной шайбы насоса ГОП приводит к снижению этого показателя в 5 раз - до величины ±0,0012 $^1/_м$ (рис. 4, график 1).

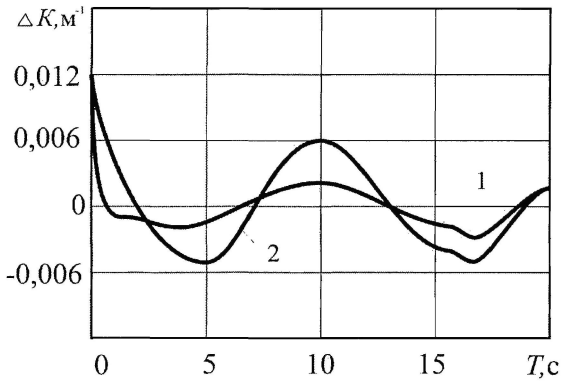

Рис. 4. Зависимость от времени разности управляющего воздействия водителя и реальной кривизны траектории

Если перейти к безразмерным величинам, разделив разность кривизны на текущее значение кривизны, задаваемой штурвалом, то получим ошибку управления в процентах. Её можно считать показателем качества управления поворотом или точностью управления. Самое главное - это количественный параметр. В приведенном ниже примере при регулировании наклонной шайбы по прототипу относительная ошибка управления составляет ±100 %, а при введении дополнительного регулирования наклонной шайбы ГОП ошибка снижается до ±10 %.

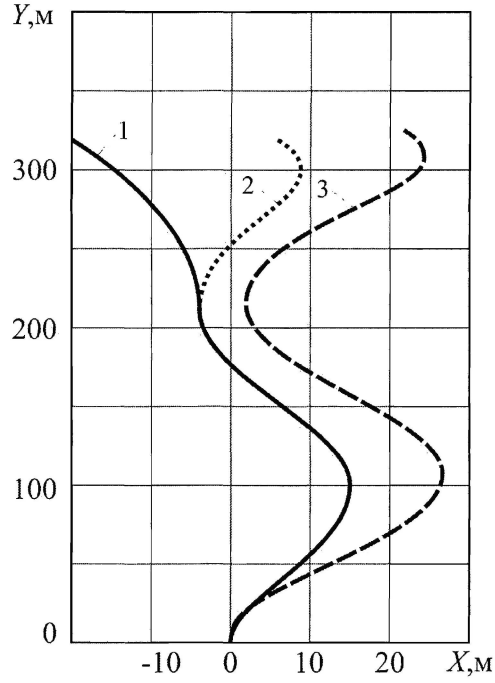

Рис. 5. Траектория движения при увеличении сопротивления под левой гусеницей

Рассмотрим траектории движения. В случае смены грунта под одной из гусениц (на «змейке») машина сходит с заданной траектории (кривая 1, рис. 5). При этом средняя скорость 16,8 м/с. Исходная траектория без смены грунта (кривая 2). Смена грунта под обеими гусеницами не приводит к сходу с траектории, но снижает среднюю скорость движения с 17,3 м/с до 16,8 м/с. Дополнительное регулирование насоса ГОП кардинальным образом изменяет траекторию движения центра тяжести (ЦТ) БГМ: она копирует на местности и во времени положение штурвала (кривая 3, рис. 5).

Смена грунта изменяет только линейную скорость движения машины (в данном примере с 17,3 до 16,3 м/с).

Анализ движения машины по «змейке» при смене грунта показал, что применение новых законов дополнительного регулирования наклонной шайбы ГОП существенно влияет на траекторию. При исходном значении сопротивлений амплитуда траектории - 18 м, при увеличении сопротивления под обеими гусеницами одновременно - амплитуда 15 м, период - 225 м. При увеличении сопротивления под одной гусеницей явный увод в сторону большего сопротивления, амплитуда траектории - 15 м, период - 225 м. С применением дополнительного регулирования увода нет, амплитуда - 25 м, период - 213 м при всех условиях.

Таким образом, применение выработанных законов дополнительного автоматического регулирования насоса ГОП позволяет компенсировать утечки гидрообъёмного привода и буксование гусениц, что обеспечивает повышение точности управления поворотом и динамическую устойчивость поворота.

Предотвращение заноса. Дополнительное регулирование наклонной шайбы насоса ГОП снижает ошибку управления поворотом на порядок. В некоторых случаях удается стабилизировать машину в повороте. Однако этого бывает недостаточно. При резком повороте штурвала ма-

шина неизбежно уходит в занос, несмотря на систему слежения и стабилизации траектории движения. Часто задаваемые водителем через штурвал траектории движения не могут быть реализованы на большой скорости. Опыт и квалификация водителя подсказывают ему, насколько нужно снизить скорость движения за счет уменьшения подачи топлива, торможения двигателем и штатными тормозами.

Математическая модель [5, 7] позволяет имитировать перечисленные выше операции. На местности в случае превышения кривизны траектории над задаваемой штурвалом подача топлива в двигатель прекращается и двигатель вместо источника энергии становится его потребителем в виде момента сопротивления, пропорционального частоте вращения ДВС. Как только ситуация с кривизной выправляется, подача топлива возобновляется. Однако процессы регулирования поворотом настолько динамичны, что торможения двигателем оказывается недостаточно.

Имитационное моделирование движения БГМ позволило отработать различные алгоритмы управления тормозами при угрозе заноса. Рассмотрены варианты принудительного торможения машины с помощью штатных тормозов. Торможение обеими гусеницами не приводит к желаемому результату, машина из заноса не выходит; торможение отстающего борта тем более, а торможение забегающего борта, как это не парадоксально, приводит к стабилизации поворота.

Анализ результатов показал, что выполнение маневра по входу в поворот благодаря введению в действие новых законов управления наклонной шайбы насоса ГОП, двигателя и тормозов стало возможным с большей средней скоростью: прототип может войти в круг диаметром 21м только на 3 передаче со средней скоростью 11,5 м/с, а усовершенствованная машина - на 4 передаче со средней скоростью 14,7 м/с (на 27 % быстрее); на круге диаметром 27 м аналогично 11,5 м/с и 15,6 м/с (на 35% быстрее). Без дополнительного торможения забегающего борта машина не может избежать заноса при относительном повороте штурвала больше 0,5 на 4 передаче и 0,6 на 3 передаче. Тормоз забегающего борта включается автоматически при угрозе заноса в виде разности кривизны траектории, задаваемой штурвалом и реализуемой на местности.

Выводы справедливы для механической и гидромеханической трансмиссии. Во всех случаях, в том числе и на границе заноса дополнительное регулирование наклонной шайбы ГОП обеспечивает ошибку управления поворотом в пределах 10 % в переходном процессе и не более 5 % - в установившемся движении по кругу. При пропорциональной связи штурвала и наклонной шайбы ГОП ошибка составляла 50 % и более.

Дополнительное регулирование насоса ГОП для машин с ГМТ и приводом ГОП механизма поворота от ДВС. Известна проблема поддержания радиуса криволинейного движения для машин с гидромеханической трансмиссией и гидрообъёмным механизмом поворота, в которых ГОП приводится по вращение от коленчатого вала ДВС («Леопард-2», БМП «Мардер», БМП-3). При такой компоновке подача насоса ГОП пропорциональна частоте вращения двигателя, а скорость движения машины пропорциональна частоте вращения турбины гидротрансформатора. При неизменном положении штурвала управления поворотом и увеличении нагрузки на ведущих колесах уменьшается скорость вращения турбины ГТ и скорость машины *V*, угловая же скорость со остается неизменной, кривизна траектории изменяется независимо от водителя. Проведено имитационное моделирование криволинейного движения машины с ГМТ. Смоделирован рост сопротивления перемещению под обеими гусеницами в 4 раза с ϕ=0,02 до ϕ=0,08 в момент времени t=5 с.

По графику 2 (рис. 6) видно, что до момента смены грунта при t=5 с машина успевает войти в установившийся поворот с кривизной траектории K=0,015 1/м. Рост сопротивления приводит к снижению частоты вращения турбины при сохранении частоты вращения ДВС (соответственно и насоса

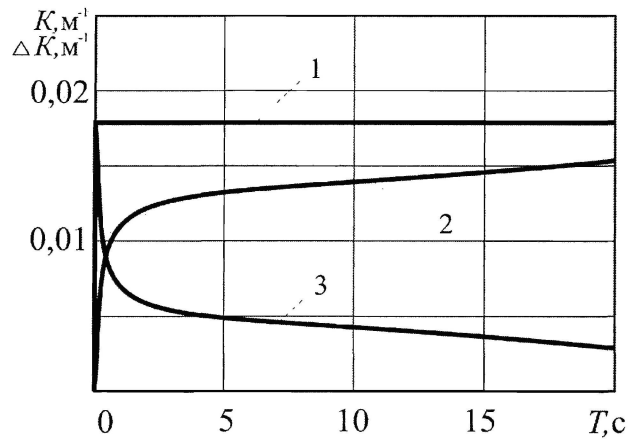

Рис. 6. Зависимость от времени кривизны траектории, задаваемой штурвалом (1), реализуемой на местности (2) и их разность (3). ГМТ без дополнительного регулирования наклонной шайбы насоса ГОП

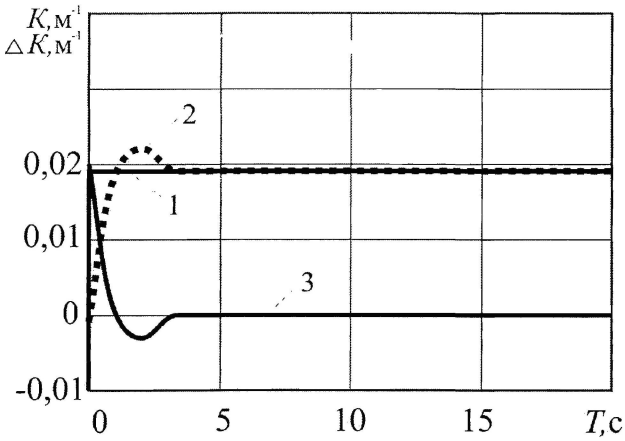

Рис. 7. Зависимость от времени кривизны траектории, задаваемой штурвалом (1), реализуемой на местности (2) и их разность (3). ГМТ с дополнительным регулированием наклонной шайбы насоса ГОП

ГОП). В целом это приводит к росту кривизны траектории до K=0,018 1/м (на 20 %), напомню - при неизменном положении штурвала. При этом средняя скорость за 20 с движения составила 14,3 м/с. Диаметр описываемого круга составляет 135 м, причем траектория меняется по кривизне в момент времени t=5 с. Введение дополнительного регулирования наклонной шайбы ГОП при тех же условиях входа в поворот и движения по кругу со сменой грунта в момент времени t=5 с приводит к результатам, изображенным на рис. 7. Отметим, что скорость движения и передаточное отношение гидротрансформатора протекают во времени так же, а траектория движения существенно изменяется.

Таким образом, введение дополнительного регулирования наклонной шайбы ГОП, привело к положительному эффекту для ГМТ, выразившемуся в следующем: ошибка управления уменьшилась с 25 % до 4 %; исключено влияние нагрузки на ведущие колёса, на кривизну траектории движения.

Движение по среднестатистической трассе. Любая трасса может быть разложена на составляющие элементы, такие как движение прямо, движение по дугам окружности различного радиуса и движение по траектории переменной кривизны типа синусоиды с различной амплитудой и периодом. В книге [8] приведена статистика дорог европейской части бывшего СССР. Их кривизна укладывается в диапазон $0{,}033 < K < 0{,}04$ м$^{-1}$. Наиболее вероятные фрагменты трассы включены в имитационную модель. Кривизна траектории, заданной штурвалом (рис. 8-9), соответствует графикам 1, а графики 2 соответствуют кривизне, реализуемой на местности.

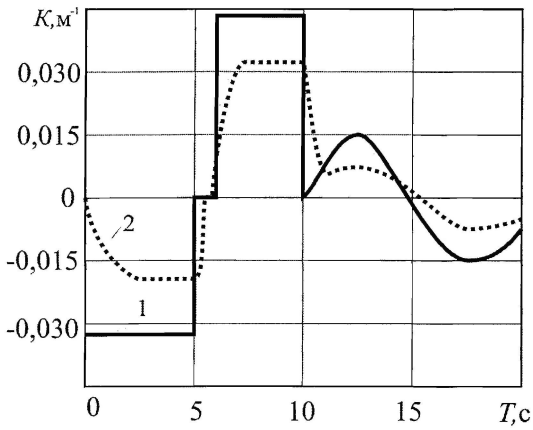

Рис. 8. Зависимость от времени кривизны траектории. Движение на 3 передаче (12 м/с) машины-прототипа

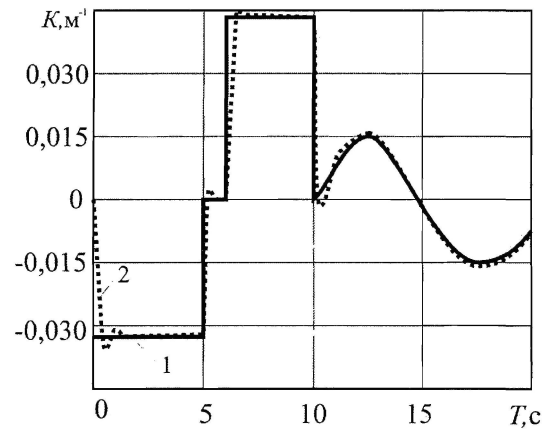

Рис. 9. Зависимость от времени кривизны траектории. Движение на 3 передаче (12 м/с) машины, оборудованной дополнительным регулированием насоса ГОП

Движение по реальной местности опасно участками с большой кривизной траектории. На третьем участке в первую очередь можно ожидать заноса. До тех пор, пока гарантирована плавность изменения траектории движения, и трасса состоит только из поворотов большого радиуса, преимущество реализации новых законов управления двигателем, ГОП и тормозов в процессе криволинейного движения заключается только в точности управления.

Благодаря системе дополнительного регулирования подачи насоса ГОП, центр тяжести БГМ перемещается по траектории, заданной штурвалом с ошибкой по кривизне не более 10% при рез-

ком перемещении штурвала и в пределах 2-3 % при плавном перемещении штурвала. Машина-прототип имеет ошибку по кривизне траектории 50 %.

При переброске штурвала на 4 передачу машина-прототип уходит в занос. Таким образом, прохождение этой трассы возможно машиной-прототипом только на 3 передаче со средней скоростью 10,1 м/с. Автоматизация системы управления криволинейным движением позволяет машине благополучно преодолеть трассу на 4 передаче со средней скоростью 13,5 м/с и ошибкой не более 3 %.

Таким образом, реализация новых закономерностей управления двигателем, насосом ГОП и тормозами позволила преодолеть трассу с опасными по заносу участками на 4 передаче вместо 3 и увеличить среднюю скорость движения с 10,1 м/с до 13,5 м/с, то есть на 33 %.

Выводы

1. Автоматизация управления поворотом БГМ позволила увеличить точность управления поворотом, снизить ошибку управления с десятков процентов до 2-3 % в установившемся повороте и до 10 % на переходных режимах.

2. Ошибка управления поворотом по разности кривизны траектории, задаваемой штурвалом и реализуемой на местности, позволила определить критерий управляемости количественно.

3. Имитационное моделирование подтвердило возможность предотвращения заноса торможением двигателем и торможением забегающего борта.

4. Реализация новых закономерностей управления двигателем, насосом ГОП и тормозами при движении на границе заноса позволили преодолевать трассу с опасными по заносу участками на 4 передаче вместо третьей и таким образом увеличить среднюю скорость движения с 10,1 м/с до 13,5 м/с, то есть на 33 %.

5. Имитационное моделирование движения по кругу и по трассе типа «змейки» показало эффективность дополнительного регулирования наклонной шайбы ГОП, ошибка управления при этом снижается с 50 % до 3-4%.

6. Применение автоматизированной системы управления поворотом обеспечило стабильность траектории движения на «миксте».

7. Применение новых законов регулирования поворотом для гидромеханической трансмиссии с приводом насоса ГОП механизма поворота от двигателя (схема Леопарда-2) показало эффективность в поддержании кривизны траектории, заданной штурвалом, при увеличении сопротивления движению: ошибка управления по кривизне снижается с 50-80 % до 5-8 % на разных трассах и разных грунтовых условиях.

Литература

1. Динамика быстроходного танка / А.А. Благонравов, СЕ. Бурцев, А.А. Дмитриев и др. - М.: Изд. АБТВ, 1968. - 505 с.

2. Красненькое, В.И. Основы теории управляемости транспортных гусеничных машин / В.И. Красненькое. -М.: МВТУ им. Баумана, 1977. - 264 с.

3. Держанский, В.Б. Критерии управляемости гусеничной машины и синтез оптимального управления: due. ... д-ра техн. наук/В.Б. Держанский. -Курган, 1997. - 350 с.

4. Бекетов, С.А. Повышение средней скорости движения танка за счет улучшения управляемости: дис. ... канд. техн. наук/С.А. Бекетов. -М.: В А БТВ, 1992. - 139 с.

5. Кондаков, СВ. Обеспечение управляемости быстроходных гусеничных машин на переходных режимах криволинейного движения: монография / СВ. Кондаков. - 2-е изд., испр. и доп. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. - 102 с.

6. Кондаков, СВ. Моделирование взаимодействия гусениц с грунтом при неустановившемся повороте быстроходной гусеничной машины / СВ. Кондаков, СИ. Черепанов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». -2008. -Вып. 12. -№23 (123). - С. 26-31.

7. Кондаков, СВ. Имитационное моделирование криволинейного движения быстроходной гусеничной машины с системой динамической стабилизации поворота / СВ. Кондаков // Сб. научных трудов, посвященный 100-летию со дня рождения М.Ф. Балжи. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. - С 95-100.

8. Савочкин, В. А. Статистическая динамика транспортных и тяговых машин / В.А. Савочкин, А.А. Дмитриев. -М.: Машиностроение, 1993. - 320 с.

***Поступила в редакцию 20 июля 2009* г.**

Кондаков Сергей Владимирович. Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Специальные и дорожно-строительные машины» Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов - теория движения, бесступенчатые передачи, управляемость криволинейного движения быстроходных гусеничных машин.

Kondakov Sergey Vladimirovich. Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Professor of the Special and Road-Building Machine department of South Ural State University. Professional interests - theory of movement, continuous variable transmissions, driving of curvilinear movement of a high-speed tracked vehicles.