

# Расчет и конструирование

УДК 629.053 + 004.942

DOI: 10.14529/engin200101

## РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ С ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

**С.В. Кондаков, О.О. Павловская, А.Р. Ишбулатов**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

В статье изложены результаты разработки стенда для полунатурного моделирования системы управления движением гусеничной машины с гидростатической трансмиссией, предназначенного как для обучения программированию логических контроллеров, так и для тестирования алгоритмов управления на стадии их разработки. Выполнен анализ известных на рынке технических решений с выявлением у них основных недостатков. В рамках концепции полунатурного моделирования составлена и реализована структура. Представлена математическая модель системы управления движением гусеничной машины с гидростатической трансмиссией, выполненная на базе промышленного гусеничного трактора класса тяги 15 т производства ОАО «Завод дорожно-строительной техники «Урал» и адаптированная под потребности стенда. Сформирован комплекс алгоритмов управления, включающий в себя алгоритм управления движением гусеничной машины, алгоритм включения тормоза забегающего борта при угрозе возникновения заноса и алгоритм включения тормоза отстающего борта при перегрузке гидрообъемного механизма по давлению. Для организации ввода исходных данных, а также наблюдений за результатами моделирования в программном пакете Altair Embed разработана система визуализации, включающая в себя мнемосхему панели оператора с демонстрацией изменения основных параметров движения гусеничной машины (скорости центра тяжести; траектории движения центра тяжести; параметров регулирования подачи насосов; кривизны траектории (заданной и текущей); скорости вращения гусениц на левом и правом бортах; коэффициента сопротивления грунта под каждой гусеницей), панель настройки алгоритмов управления движением гусеничной машины, панель настройки параметров грунта и панель выбора траектории движения гусеничной машины.

*Ключевые слова:* полунатурное моделирование, алгоритм управления движением, гусеничная машина, программируемый логический контроллер, стенд, система визуализации.

### Введение

В настоящее время системы управления на основе программируемых логических контроллеров (ПЛК) широко используются в различных областях: от систем управления движением до систем распределения электроэнергии, от устройств управления параметрами среды до нефтепегонных комплексов. На этапе эскизного проектирования систем автоматического управления (САУ) детально прорабатываются возможные варианты алгоритмов управления объектом, а эффективность алгоритмов управления можно установить только по результатам тщательных исследований макетного образца системы.

Отладку алгоритмов обработки информационных сигналов и алгоритмов управления в различных эксплуатационных условиях можно проводить в реальных условиях эксплуатации системы. Однако не всегда есть возможность проведения натуральных испытаний, например система управления находится на стадии проектирования; проведение натуральных испытаний по настройке и отладке алгоритма работы устройства управления дорого или небезопасно. Замена натуральных испытаний математическим моделированием системы тоже не всегда уместна, так как часто алгоритмы управления сложны, громоздки и при математическом моделировании исследователь прибегает к их упрощению. В таких случаях для отладки алгоритмов управления целесообразна организация полунатурного моделирования системы управления [1], при котором часть системы,

## Расчет и конструирование

в том числе само устройство управления, реализуется в виде реальной аппаратуры, например ПЛК, а остальная часть системы (включая объект управления), называемая отброшенной частью системы управления, представляется математической моделью. Благодаря добавлению реальной аппаратуры в контур моделирования сложных процессов, можно добиться уменьшения априорной неопределенности при исследовании процессов, для которых нет полного и адекватного математического описания.

На предприятиях, разрабатывающих системы автоматического управления движением гусеничных подвижных объектов, для сотрудников одинаково важными считаются и навык проектирования алгоритмов управления, и навык программирования ПЛК. Поэтому для таких предприятий актуальной задачей является создание стенда, на котором работники смогут получить практические навыки работы с программируемыми логическими контроллерами в составе системы управления, ознакомиться с особенностями программирования и настройки ПЛК, а также смогут проводить испытания и отладку проектируемых алгоритмов управления движением гусеничной машины.

Анализ известных на рынке технических решений [2–7] показал, что основными недостатками существующих учебно-лабораторных стендов для обучения программированию ПЛК и стендов для отработки алгоритмов управления являются: высокая стоимость (свыше 430 тыс. руб.) при избыточном функционале; закрытая архитектура и связанная с этим сложность масштабирования стенда; скрытое от пользователя устройство и реализация стендового оборудования, что затрудняет процесс обучения; необходимость после покупки стенда в замене модели реализованного на стенде объекта управления на математическую модель конкретной гусеничной машины с гидростатической трансмиссией, а контроллера стенда – на ПЛК, используемый на предприятии, что эквивалентно разработке нового стенда.

Поэтому целью данной работы является разработка аппаратной и программной части учебно-лабораторного стенда для полунатурного моделирования системы управления движением гусеничной машины (ГМ) на базе трактора ТМ-10 на базе контроллера Bosch-Rexroth и для отработки алгоритмов управления на стадии их разработки.

Структурная схема учебно-лабораторного стенда представлена на рис. 1.

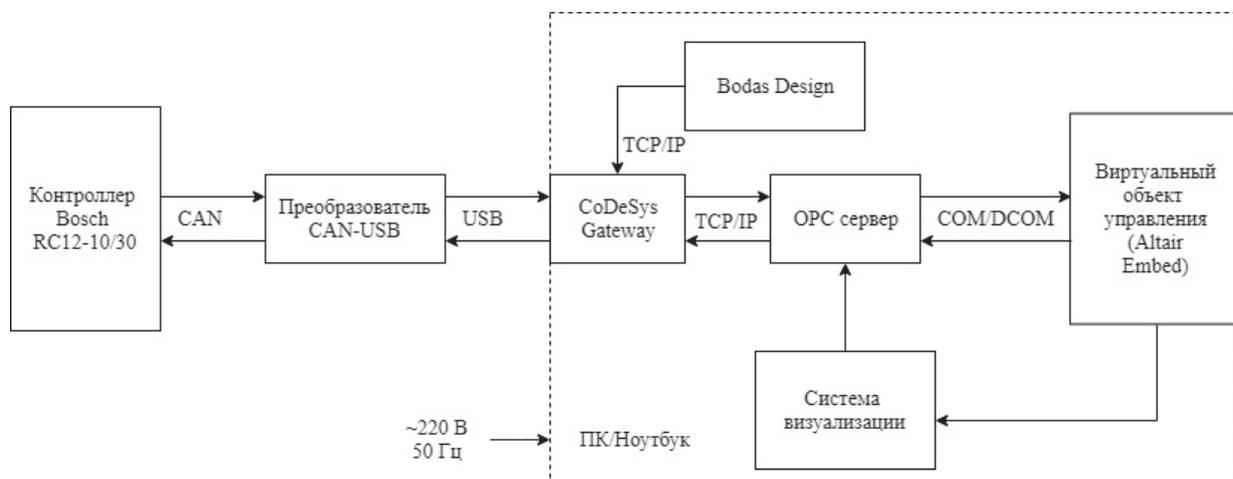


Рис. 1. Структурная схема учебно-лабораторного стенда

В качестве реальной аппаратуры в стенде применяется устройство управления, реализованное на контроллере Bosch RC12-10/30, а также интерфейсный преобразователь CAN-USB CAN-fox EC2112 как элемент устройства сопряжения с объектом управления. Отброшенной частью системы в учебно-лабораторном стенде является транспортная платформа с двигателем внутреннего сгорания (ДВС), гидростатической трансмиссией (ГСТ), выполненной по бортовой схеме, и гусеничным движителем. Прототипом платформы является промышленный гусеничный трактор класса тяги 15 т производства ОАО «Завод дорожно-строительной техники «Урал», г. Челябинск. Отброшенная часть системы управления ГМ с гидростатической трансмиссией (ГСТ) совместно с имитатором внешних воздействий и задающим устройством реализована на персональном компьютере в программном пакете Altair Embed 2019.

Схема плоскопараллельного движения ГМ, схема моторно-трансмиссионной установки ГМ, а также основные уравнения связей, характеризующие взаимодействие гусениц с грунтом, перераспределение веса машины при повороте по бортам, формирование тяговых усилий на гусеницах, сопротивление прямолинейному движению и повороту ГМ подробно рассмотрены в работах [8–11].

Математическая модель криволинейного движения платформы на плоскости представляет собой систему трех дифференциальных уравнений в форме уравнений Лагранжа второго рода:

$$\begin{cases} \frac{d^2 X_C}{dT^2} = [(P_2 + P_1 - Pf_1 - Pf_2) \sin \varphi + R_6 \cos \varphi] \frac{g}{G}, \\ \frac{d^2 Y_C}{dT^2} = [(P_2 + P_1 - Pf_1 - Pf_2) \cos \varphi - R_6 \sin \varphi] \frac{g}{G}, \\ \frac{d^2 \varphi}{dT^2} = [(P_2 - P_1 + Pf_1 - Pf_2) \frac{B}{2} - \text{sign} \frac{d\varphi}{dT} M_C] \frac{1}{J_C}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $T$  – текущее время, с;  $X_C, Y_C$  – координаты центра тяжести ГМ, м;  $\varphi$  – курсовой угол, рад;  $P_1, P_2$  – силы тяги на левом и правом бортах;  $Pf_1, Pf_2$  – сопротивление передвиганию на левом и правом бортах;  $R_6$  – боковая сила инерции;  $M_C$  – момент сопротивления повороту, формирующийся силами и моментами трения;  $G$  – вес платформы;  $J_C$  – момент инерции платформы относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести;  $g$  – ускорение свободного падения.

Моторно-трансмиссионная установка имеет три степени свободы и описывается тремя дифференциальными уравнениями первого порядка [11–13]:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{ГН}}{dT} = [M_D - M_{ГН1} - M_{ГН2}] \frac{1}{J_1}, \\ \frac{d\omega_{M1}}{dT} = [M_{M1} - \frac{P_1 R_{ВК}}{i_{6р}}] \frac{1}{J_2}, \\ \frac{d\omega_{M2}}{dT} = [M_{M2} - \frac{P_2 R_{ВК}}{i_{6р}}] \frac{1}{J_3}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\omega_{ГН}, \omega_{M1}, \omega_{M2}$  – угловые скорости валов ДВС и моторов ГОП;  $M_D, M_{ГН1}, M_{ГН2}$  – крутящие моменты на валах ДВС и насосов гидрообъемных передач (ГОП);  $M_{M1}, M_{M2}$  – моменты на моторах ГОП;  $R_{ВК}$  – радиус ведущего колеса;  $i_{6р}$  – передаточное число бортового редуктора;  $J_1, J_2, J_3$  – моменты инерции соответствующих масс.

Гидрообъемные передачи (ГОП) описываются алгебраическими уравнениями для давления в каждой из магистралей [14, 15]:

$$\begin{cases} \frac{dP_{ГОП11}}{dT} = [Q_{Н1} - Q_{M1} - Q_{k11} + Q_{k12} + Q_{kpp11} - \Delta Q_{Н11} - \Delta Q_{M11}] \frac{E}{V_1}, \\ \frac{dP_{ГОП12}}{dT} = [Q_{M1} - Q_{Н1} + Q_{k11} - Q_{k12} + Q_{kpp12} - \Delta Q_{Н12} - \Delta Q_{M12}] \frac{E}{V_2}, \\ \frac{dP_{ГОП21}}{dT} = [Q_{Н2} - Q_{M2} - Q_{k21} - Q_{k22} + Q_{kpp21} - \Delta Q_{Н21} - \Delta Q_{M21}] \frac{E}{V_1}, \\ \frac{dP_{ГОП22}}{dT} = [Q_{M2} - Q_{Н2} + Q_{k22} - Q_{k21} + Q_{kpp22} - \Delta Q_{Н22} - \Delta Q_{M22}] \frac{E}{V_2}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $P_{ГОП11}, P_{ГОП12}$  – давления в магистралях нагнетания и всасывания первой ГОП;  $P_{ГОП21}, P_{ГОП22}$  – давления в магистралях нагнетания и всасывания второй ГОП;  $Q_{Н1}, Q_{M1}$  – расходы насоса и мотора первой ГОП;  $Q_{Н2}, Q_{M2}$  – 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;  $\Delta Q_{Н}, \Delta Q_{М}$  – утечки в насосах и моторах;  $E$  – модуль упругости жидкости в магистралях;  $V_1, V_2$  – объемы соответствующих магистралей.

Связь реальной части системы управления с отброшенной частью осуществляется через технологию OPC. Так, управляющие сигналы с контроллера через преобразователь CAN-USB поступают в ПК (шлюз CoDeSys Gateway), затем сигналы по протоколу TCP/IP передаются в OPC-сервер, и уже оттуда по протоколу COM/DCOM поступают в Altair Embed, где реализована отброшенная часть системы управления движением ГМ. Информационно-измерительные сигналы передаются в контроллер по тому же пути в обратном направлении. Интерфейсный преобразователь CAN-USB CANfox EC2112, шлюз CoDeSys Gateway и OPC-сервер являются составными частями устройства сопряжения с объектом (УСО).

## Расчет и конструирование

### Формирование алгоритмов управления движением гусеничной машины с гидростатической трансмиссией

Управление движением платформы осуществляется изменением производительности (подачи) насосов ГОП [16]. Гидромоторы имеют два режима – рабочий и транспортный. Иными словами, насосы непрерывно регулируемые, а моторы двухпозиционные. При движении прямо насосы регулируются синхронно, а при повороте уменьшается подача насоса отстающего борта [17].

Одними из наиболее значимых преимуществ ГОП в механизме поворота являются внешняя автоматичность и возможность бесступенчатого регулирования. В работах [18, 19] предлагается использовать обратную связь при регулировании подачи насоса ГОП отстающего борта по отклонению кривизны траектории  $k_{ш}$ , задаваемой штурвалом, от текущей кривизны траектории  $k_{д}$ , реализуемой ГМ на местности. Регулирование подачи насоса именно по  $\Delta k = k_{ш} - k_{д}$  позволяет обеспечить движение ГМ по замкнутой траектории независимо от влияния внешних возмущений  $f$  со стороны грунта, поскольку стабилизация  $k_{д} = R^{-1}$ , где  $R$  – радиус разворота ГМ, – это, по сути, обеспечение  $R = \text{const}$ , при  $f = \text{var}$ .

Структурная схема автоматической системы (АС) управления движением гусеничной платформы приведена на рис. 2.

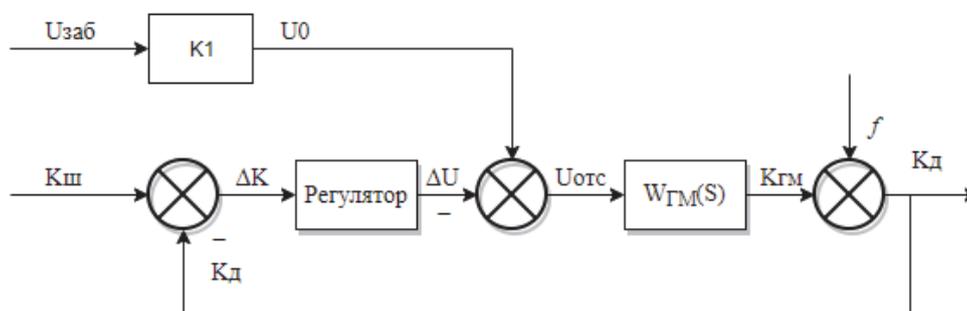


Рис. 2. Структурная схема АС управления движением ГМ:  $W_{ГМ}(s)$  – передаточная функция ГМ;  $f$  – возмущение (изменение  $k_{ГМ}$ , вызванное влиянием изменяющейся нагрузки со стороны грунта и неучтенными потерями в насосах и моторах ГОП)

Автоматическая система управления подачей насоса отстающего борта работает следующим образом: опорный сигнал  $U_{ЗАБ}$  подачи насоса забегающего борта задает скорость прямолинейного движения платформы. В случае нулевой кривизны проложенной трассы и отсутствия внешних помех движению параметр регулирования подачи насоса отстающего борта  $U_{ОТС} = U_{ЗАБ}$ , и платформа движется прямо. При появлении помех, например буксования одной из гусениц, или утечек в одной из ГОП, АС по разности кривизны реальной траектории центра тяжести и заданной линией на местности корректирует подачу насоса отстающего борта и прямолинейное движение восстанавливается. При повороте соотношение  $U_{ЗАБ}$  и  $U_{ОТС}$  задается кривизной трассы. В качестве регулятора применяется ПИД-регулятор с возможностью настройки его параметров в системе визуализации. Единичная обратная связь и регулятор обеспечивают точное соответствие кривизны траектории центра тяжести проложенной на местности линии маршрута.

Параметр регулирования подачи насоса отстающего борта определяется следующим образом:

$$U_{ОТС} = k1 \cdot U_{ЗАБ} - \left[ k_{П} \cdot (\Delta k) + k_{И} \cdot \int (\Delta k) dt + k_{Диф} \frac{d(\Delta k)}{dt} \right], \quad (4)$$

где

$$k1 = \frac{1/k_{ш} - B/2}{1/k_{ш} + B/2}, \quad (5)$$

$k_{П}, k_{И}, k_{Диф}$  – настроечные параметры пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющей регулятора соответственно.

Текущая кривизна траектории  $k_{д}$  вычисляется как отношение угловой скорости поворота машины  $\omega_{М}$ , измеряемой вибрационным датчиком угловой скорости – микромеханическим гироскопом, к продольной скорости центра тяжести машины  $V_{М}$ , оцениваемой по частоте вращения выходного вала коробки передач.

$$k_d = \frac{\omega_M}{V_M} \quad (6)$$

Параметры  $U_{ЗАБ}$  и  $U_{ОТС}$  соотносятся с параметрами регулирования насосов первого и второго ГОП  $u_{Н1}$ ,  $u_{Н2}$  в зависимости от знака кривизны штурвала  $k_{ш}$ . Таким образом, при повороте направо ( $k_{ш} > 0$ ) насос второго ГОП, расположенного на левом борту гусеничной машины, является насосом забегающего борта, то есть  $u_{Н2} = U_{ЗАБ}$ , а насос первого ГОП, расположенного на правом борту ГМ, является насосом отстающего борта, то есть  $u_{Н1} = U_{ОТС}$ . При повороте налево ( $k_{ш} < 0$ ) забегающим бортом является правый борт ГМ, а отстающим – левый:  $u_{Н1} = U_{ЗАБ}$ ,  $u_{Н2} = U_{ОТС}$ .

В [19] показана эффективность отдельной работы тормозов при угрозе заноса и при перегрузке ГОП по давлению. На основе данной работы сформированы алгоритм включения тормоза забегающего борта при угрозе заноса и алгоритм включения тормоза отстающего борта при перегрузке гидрообъемного механизма поворота по давлению.

Тормоз на забегающем борту включается в звонковом режиме при превышении текущей кривизны траектории  $k_d$ , реализуемой ГМ на местности, над кривизной траектории  $k_{ш}$ , задаваемой штурвалом, на величину, равную или большую  $\varepsilon$ .

Тормоз на отстающем борту включается в звонковом режиме при достижении относительно-го давления в магистрали ГОП отстающего борта – 80 % от максимально допустимого давления.

Для удобной работы на учебно-лабораторном стенде была разработана система визуализации в графической среде Altair Embed, представляющая собой графический интерфейс пользователя.

На мнемосхеме панели оператора (рис. 3) демонстрируются графики изменения: скорости центра тяжести; траектории движения центра тяжести; параметров регулирования подачи насоса ГОП1 и ГОП2; кривизны траектории (заданной и текущей); скорости вращения гусениц на левом и правом бортах; коэффициента сопротивления грунта под каждой гусеницей.

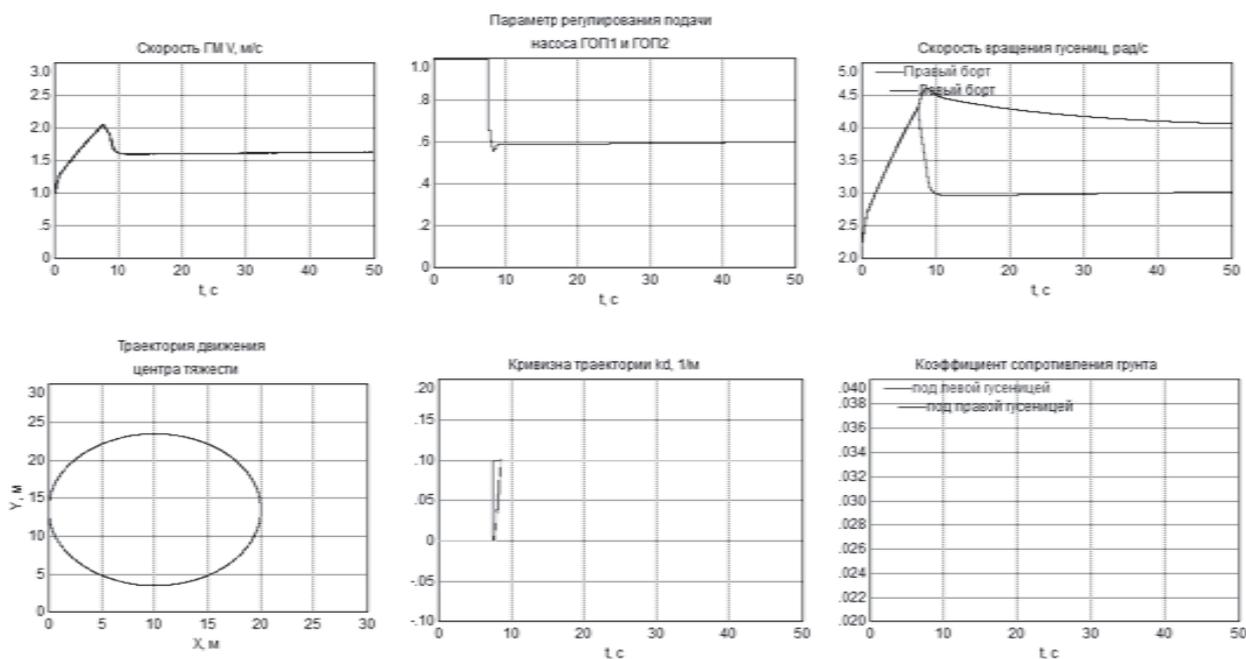


Рис. 3. Мнемосхема панели оператора

С помощью панели выбора траектории движения (рис. 4) устанавливается один из вариантов изменения траектории движения во время моделирования. Для каждого типа траектории движения выполнены два варианта реализации: зависимость от времени и зависимость от пути. На панели можно выбрать один из вариантов реализации и установить настроечные параметры.

На панели настройки алгоритмов управления движением гусеничной машины (рис. 5) задается тип регулятора, используемый в алгоритме управления, и выбираются его настроечные параметры. Также на панели активируются или деактивируются алгоритмы включения тормоза на забегающем или отстающем борту и выбираются настроечные параметры для работы алгоритмов.

## Расчет и конструирование

<input type="radio"/> Прямолинейное движение <input type="radio"/> Движение по кругу <input checked="" type="radio"/> Движение по "змейке" <input type="radio"/> Маневр "перестроение" <input type="radio"/> Среднестатистическая трасса <input type="radio"/> Произвольная траектория	Кривизна траектории $K_{rd} = 0.1$ Промежуток между поворотами (по умолчанию: $S=10, t=10$ ) <table border="1"> <tr> <td>Функция времени</td> <td>Функция пути</td> </tr> <tr> <td colspan="2">S = 12</td> </tr> </table>	Функция времени	Функция пути	S = 12	
Функция времени	Функция пути				
S = 12					

Рис. 4. Панель выбора траектории движения

<input type="radio"/> П-регулятор	KP = 1	TN = TV = 0	
<input type="radio"/> И-регулятор	TN = 1	KP = TV = 0	
<input checked="" type="radio"/> ПИ-регулятор	KP = 1.35	TN = 3.5	TV = 0
<input type="radio"/> ПД-регулятор	KP = 1	TV = 1	TN = 0
<input type="radio"/> ПИД-регулятор	KP = 1	TN = 1	TV = 1

Алгоритм включения тормоза на забегавшем борту при угрозе заноса		
Статус: АКТИВЕН	$\varepsilon = 0.0001$	Мтз = 0.3

Алгоритм включения тормоза на отстающем борту при перегрузке ГОП по давлению		
Статус: ОТКЛЮЧЕН	$P_{lim} = 0.75$	Мто = 0.01

Рис. 5. Панель настройки алгоритмов управления движением гусеничной машины

Постоянный грунт			Меняющийся грунт		
Левая гусеница		Правая гусеница	Левая гусеница	Разовое изменение	Правая гусеница
<input type="radio"/>	Асфальт Сухой грунт Влажный грунт Луг Снег	<input checked="" type="radio"/>	Начальное значение		
<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	0.04	0.05	
<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	Изменение по времени	Изменение по пройденному пути	
<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	t = 20	s = 10	
<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	Конечное значение		
<input checked="" type="radio"/>		<input type="radio"/>	0.06	0.08	
Значение по умолчанию:			Случайное распределение в пределах выбранного типа грунта		
		.04	.02		
Ползунок			Песок		
		0	0	Сухой грунт	

Рис. 6. Панель настройки параметров грунта

На панели настройки параметров грунта (рис. 6) организована возможность выбора пользователем того, будет ли меняться коэффициент сопротивления грунта во время моделирования. Для «постоянного грунта» пользователем выбирается тип грунта под каждой гусеницей, а также устанавливается значение его коэффициента сопротивления «по умолчанию» или на определен-

ном уровне в пределах допустимого диапазона изменением положения ползунка в соответствующем поле. Для «меняющегося грунта» выбирается режим разового изменения грунта под каждой гусеницей в зависимости от времени моделирования или пройденного пути и устанавливаются начальное и конечное значения коэффициента. Также пользователь может выбрать режим случайного распределения значения в пределах выбранного типа грунта и установить необходимый тип грунта для каждой гусеницы.

### Заключение

Разработан и реализован стенд для полунатурного моделирования системы управления движением гусеничной машины ТМ-10 с гидростатической трансмиссией, предназначенного как для обучения программированию ПЛК Bosch RC12-10/30, так и для тестирования алгоритмов управления движением машины на стадии их разработки. Под потребности стенда адаптирована математическая модель системы управления движением гусеничной машины, сформирован комплекс алгоритмов управления, включающий алгоритм управления движением гусеничной машины, алгоритм включения тормоза забегающего борта при угрозе возникновения заноса и алгоритм включения тормоза отстающего борта при перегрузке гидрообъемного механизма по давлению.

### Литература

1. Математическое моделирование в технике: учеб. для вузов / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 496 с.
2. Иванкин, И.Д. Микроконтроллерный стенд для управления мехатронными объектами / И.Д. Иванкин, Д.А. Теличенко // Вестник АмГУ. Серия «Естественные и экономические науки». – Благовещенск: АмГУ. – 2015. – Вып. 71. – С. 103–111.
3. Барышников, Н.В. Использование полунатурных методов моделирования при проектировании сложных лазерных оптико-электронных систем / Н.В. Барышников // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2011. – Вып. 2. – С. 1–28. – <http://technomag.edu.ru/doc/166411.html>
4. Нестеров, А.С. Техническое описание лабораторного комплекса «Система автоматического управления ОВЕН» (САУ-ОВЕН-НН) / А.С. Нестеров. – Челябинск: Учтех-Профи, 2017. – 18 с.
5. Проектирование и внедрение лабораторного обучающего комплекса по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств» / А.Г. Лютов, С.Г. Гончарова, В.Г. Крючков, И.Ф. Месягутов // Автоматизированные технологии производства: междунар. науч.-технич. журнал. – 2016. – № 3 (13). – С. 24–31.
6. Плишивых, А.С. Стенд для испытания электронной части систем автоматического управления газотурбинного двигателя / А.С. Плишивых, А.А. Заборских, А.И. Фатыков // Вестник ПНИПУ. Серия «Электротехника, информационные технологии, системы управления». – 2017. – Вып. 2. – № 22. – С. 90–102.
7. Рыбалева, А.Н. Компьютерное моделирование нетиповых законов регулирования для программируемых логических контроллеров / А.Н. Рыбалева // Информатика и системы управления. – Благовещенск: Изд-во АмГУ. – 2016. – Вып. 4 (50). – С. 33–43.
8. Ali Volkan Akkaya. Effect of bulk modulus on performance of a hydrostatic transmission control system / Ali Volkan Akkaya // Yildiz Technical University, Turkey. Sadhana. – 2006. – Vol. 31, part 5. – P. 543–556.
9. Renius, K.Th. Continuously Variable Tractor Transmissions / K.Th. Renius, R. Resch // ASAE Distinguished Lecture. – 2005. – No. 29. – P. 1–37.
10. Rydberg, Karl-Erik. Hydrostatic Drives in Heavy Mobil Machinery – New Concept and Development Trends / K-E. Rydberg // SAE Technical. – 1998. – P. 981–989. – <https://doi.org/10.4271/981989>.
11. 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. – <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a204960.pdf> (дата обращения: 23.09.2019).
12. Lilov, I. Mathematical Modeling of Processes in the System Environment-Driver-Caterpillar Vehicle for Motion on Rout with Changeable Structure / I. Lilov, L. Lalev. – [http://www.actrus.ro/reviste/3\\_2006\\_eng/a15.pdf](http://www.actrus.ro/reviste/3_2006_eng/a15.pdf) (дата обращения: 28.09.2019).

13. *The Automotive Transmission Book* / R. Fischer, F. Küçükay, G. Jürgens et al. – Springer International Publishing Switzerland, 2015. – 355 p. DOI 10.1007/978-3-319-05263-2
14. Singer, N.C. *Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration* / N.C. Singer, W.P. Seering // *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. – 1990. – Vol. 112. – Iss. 1. – P. 76–82. DOI: 10.1115/1.2894142
15. Sorensen, K.L. *A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes* / K.L. Sorensen, W.E. Singhose, S. Dickerson // *Control Engineering Practice*. – 2007. – Vol. 15. – P. 825–837. DOI: 10.1016/j.conengprac.2006.03.005
16. Jones, S.D. *An Approach to Control Input Shaping With Application to Coordinate Measuring Machines* / S.D. Jones, A.G. Ulsoy // *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. – 1999. – Vol. 121, Iss. 2. – P. 242–247. DOI: 10.1115/1.2802461
17. Derzhanskii, V. *Stabilization of linear motion of the tracked vehicle* / V. Derzhanskii, I. Taratorkin // *SAE Technical Papers*. – 2013. – Vol. 9. DOI: 10.4271/2013-01-2363
18. Kondakov, S.V. *Efficiency of an Inertial Pulsed Torque Converter in a Vehicle Transmission* / S.V. Kondakov // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37, iss. 11. – P. 929–935.
19. Kondakov, S.V. *Turn Behavior of Energy-Efficient High-Speed Tracked Vehicle with a Smart Electrical Transmission* / S.V. Kondakov, O.O. Pavlovskaya, N.K. Goryaev // *Russian Engineering Research* – 2015. – Vol. 35, no. 2. – P. 97–101.

**Кондаков Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Колесные и гусеничные машины», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, tanksv@mail.ru.

**Павловская Ольга Олеговна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, olyapav@rambler.ru.

**Ишбулатов Артем Рашитович**, аспирант кафедры «Колесные и гусеничные машины», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, ishb.t.78@gmail.com.

*Поступила в редакцию 14 октября 2019 г.*

---

DOI: 10.14529/engin200101

## DEVELOPMENT OF A BENCH FOR SEMI-FULL-SCALE MODELING OF A CONTROL SYSTEM FOR THE MOVEMENT OF A TRACKED VEHICLE WITH A HYDROSTATIC TRANSMISSION

S.V. Kondakov, tanksv@mail.ru,  
O.O. Pavlovskaya, olyapav@rambler.ru,  
A.R. Ishbulatov, ishb.t.78@gmail.com

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Abstract: the article presents the results of the development of a bench for a semi-full-scale simulation of the motion control system of a tracked vehicle with a hydrostatic transmission, intended both for teaching programming of logical controllers and for testing control algorithms at the stage of their development. The analysis of technical solutions known on the market with the identification of their main shortcomings is performed. In the framework of the concept of semi-full-scale modeling, a structure has been drawn up and implemented. A mathematical model of the control system for the movement of a tracked vehicle with hydrostatic transmission is presented. It is made on the basis of an industrial tracked tractor of traction class 15 tons manufactured by JSC Ural Road Construction Equipment Plant and adapted to the needs of the stand. A set of control algorithms has been formed, which includes an algorithm for controlling

the movement of a caterpillar vehicle, an algorithm for activating the running-side brake when there is a risk of skidding, and an algorithm for activating the brake of the lagging side when the hydrostatic mechanism is overloaded by pressure. To organize the input of initial data, as well as observations of the simulation results, the Altair Embed software package developed a visualization system that includes an operator panel mimic diagram demonstrating changes in the basic parameters of the tracked vehicle's motion (center of gravity speed; center of gravity trajectory; pump flow control parameters; curvature of the trajectory (set and current); track rotation speed on the left and right sides; soil resistance coefficient under each track), a panel settings the algorithms for motion control of a tracked vehicle, a panel of adjustment of parameters of the soil and the selection panel motion path of the tracked vehicle.

*Keywords: semi-full-scale modeling, motion control algorithm, tracked vehicle, programmable logic controller, bench, visualization system.*

## References

1. Zarubin V.S., Krishchenko A.P. (Eds.) *Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike: uchebnik dlya vuzov* [Mathematical modeling in engineering: a textbook for universities]. Moscow, MVTU im. Bauman, 2001. 496 p.
2. Ivankin I.D., Telichenko D.A. [Microcontroller Stand for Mechatronic Objects Control] *Bulletin of Amur State University. Ser. Natural and Economic Sciences*, 2015, no. 71, pp. 103–111. (in Russ.)
3. Baryshnikov N.V. [Use of Semi-Routine Modeling Techniques in the Design of Complex Laser Optoelectronic Systems]. *Science and Education: e-Science and Technology Publication*, 2011, vol. 2, pp. 1–28. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/166411.html>.
4. Nesterov A.S. *Tekhnicheskoe opisaniye laboratornogo kompleksa "Sistema avtomaticheskogo upravleniya OWEN" (SAU-OWEN-NN)* [Technical Description of the Laboratory Complex "Automatic Control System OWEN" (SAU-OWEN-NN)]. Chelyabinsk, 2017. 18 p.
5. Lyutov A.G., Goncharova S.G., Kryuchkov V.G., Mesyagutov I.F. [Designing and Introduction of Laboratory Training Complex for Automation of Technological Processes Specialization]. *Automation of technologies and production*, 2016, vol. 3, no. 13, pp. 24–31.
6. Pleshivykh A.S., Zaborskikh A.A., Fatykov A.I. [Test bench for electronic part of gas turbine engine automatic control systems]. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Ser. Electrical engineering, information technology, control systems*, 2017, vol. 2, no. 22, pp. 90–102.
7. Rybaley, A.N. *Komp'yuternoe modelirovanie netipovykh zakonov regulirovaniya dlya programmiruemykh logicheskikh kontrollerov* [Computer simulation of atypical regulatory laws for programmable logic controllers]. *Informatika i sistemy upravleniya* [Informatics and control systems]. Blagoveshchensk, 2016, vol. 4, no. 50, pp. 33–43.
8. Ali Volkan Akkaya. Effect of bulk modulus on performance of a hydrostatic transmission control system. *Yildiz Technical University, Turkey*, 2006, vol. 31, part 5, pp. 543–556.
9. Renius K.Th., Resch R. Continuously Variable Tractor Transmissions. *ASAE Distinguished Lecture*, 2005, no. 29, pp. 1–37.
10. Rydberg Karl-Erik. Hydrostatic Drives in Heavy Mobil Machinery – New Concept and Development Trends. *SAE International*, 1998, Paper No. 981989. DOI:10.4271/981989
11. *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. – <http://www.dtic.mil/dtic/tr/full-text/u2/a204960.pdf>. (accessed 23.09.2019)
12. Lilov I., Lalev L. *Mathematical Modeling of Processes in the System Environment-Driver-Caterpillar Vehicle for Motion on Rout with Changeable Structure*, 2006. Available at: [http://www.actrus.ro/reviste/3\\_2006\\_eng/a15.pdf](http://www.actrus.ro/reviste/3_2006_eng/a15.pdf) (accessed 28.09.19).
13. *The Automotive Transmission Book* / R. Fischer, F. Küçükay, G. Jürgens et al. – Springer International Publishing Switzerland, 2015. – 355 p. DOI 10.1007/978-3-319-05263-2
14. Singer N.C., Seering W.P. Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration. *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1990, vol. 112, iss. 1, pp. 76–82. DOI: 10.1115/1.2894142
15. Sorensen K.L., Singhose W.E., Dickerson S. A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry. *Control Engineering Practice*, 2007, vol. 15, pp. 825–837. DOI: 10.1016/j.conengprac.2006.03.005

## Расчет и конструирование

---

16. Jones S.D., Ulsoy A.G. An Approach to Control Input Shaping With Application to Coordinate Measuring Machines. *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1999, vol. 121, iss. 2, pp. 242–247. DOI: 10.1115/1.2802461
17. Derzhanskii V., Taratorkin I. Stabilization of linear motion of the tracked vehicle. *SAE Technical Papers*, 2013, vol. 9. DOI: 10.4271/2013-01-2363
18. Kondakov S.V. Efficiency of an Inertial Pulsed Torque Converter in a Vehicle Transmission. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, iss. 11, pp. 929–935.
19. Kondakov S.V., Pavlovskaya O.O., Goryaev N.K. Turn Behavior of Energy-Efficient High-Speed Tracked Vehicle with a Smart Electrical Transmission. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, no. 2, pp. 97–101.

*Received 14 October 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Кондаков, С.В. Разработка стенда для полунатурного моделирования системы управления движением гусеничной машины с гидростатической трансмиссией / С.В. Кондаков, О.О. Павловская, А.Р. Ишбулатов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 5–14. DOI: 10.14529/engin200101

### FOR CITATION

Kondakov S.V., Pavlovskaya O.O., Ishbulatov A.R. Development of a Bench for Semi-Full-Scale Modeling of a Control System for the Movement of a Tracked Vehicle with a Hydrostatic Transmission. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 5–14. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin200101