

РАЗДЕЛ I

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 62-55

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЗЕМЛЕРОЙНО- ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ С СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ РАБОТАЮЩИХ ЦИЛИНДРОВ ДВИГАТЕЛЯ

С. С. Журавлев, К. В. Зубарев
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

Аннотация. Рассмотрена имитационная модель рабочего процесса землеройно-транспортной машины. Особенностью модели является наличие в ней автоматической системы отключения работающих цилиндров двигателя в зависимости от действующей на машину нагрузки, подробно описаны составные части модели. По полученным в результате моделирования данным построены осциллограммы, проведен их анализ, проведена оценка влияния метода отключения цилиндров на рабочий процесс агрегата.

Ключевые слова: землеройно-транспортная машина, двигатель, имитационная модель, отключение цилиндров, оптимизация.

Введение

Для теоретического исследования возможности использования автоматической системы отключения части цилиндров на двигателе землеройно-транспортной машины (ЗТМ) в рабочем процессе при режиме малых нагрузок (планировочные режимы, режимы холостого хода, перемещения грунта и пр.) в среде Matlab Simulink [1] разработана имитационная модель [2] рабочего процесса бульдозера Б-10М (рис. 1), позволяющая отслеживать и анализировать процессы, происходящие в ЗТМ при отключении части работающих цилиндров. Предложенная модель разбита на подмодели: подмодель системы автоматического выбора числа работающих цилиндров, согласно разработанному алгоритму; подмодель расчета сопротивлений, действующих при работе бульдозера, производящую вычисления на основе данных о базовых параметрах машины и грунтовых условиях; подмодель, имитирующую инерционность машины, сглаживающую колебания нагрузки на валу двигателя в процессе работы; подмодель, имитирующую нелинейность работы двигателя и позволяющую моделировать работу двигателя на регуляторной и корректорной ветвях характеристики; подмодель, в которой производится расчет выходных параметров бульдозерного агрегата в процессе его

работы и вывод их на экран, а также построение графиков, иллюстрирующих изменение необходимых параметров с течением времени.

Расчет основных параметров

Блок «Входные параметры» служит для задания базовых параметров машины и разрабатываемого грунта. В данной модели введены данные, характеризующие различную нагрузку при работе бульдозера Б-10М. Для задания параметров используются в основном блоки с постоянной константой. Однако, учитывая случайный характер грунтовых воздействий на машину в процессе работы [3], при задании сигнала, имитирующего нагрузку, действующую на рабочий орган, используются блоки, включающие случайные отклонения заданной величины, распределенные по нормальному закону. Случайная составляющая складывается из относительно низкочастотных колебаний большей амплитуды и относительно высокочастотных колебаний меньшей амплитуды (флуктуации и тренды). В данной модели интервал моделирования установлен равным 40 секунд. Нагрузка, действующая на рабочий орган, изменяется по истечении каждых 10 секунд в сторону увеличения, охватывая большую часть всего мощностного диапазона работы бульдозера, и достигает максимума для данной машины на последнем 10-

секундном отрезке. Для этого используются блоки задержки, значение которых соответствует одному из 4 временных отрезков.

Далее значения поступают в подмодель расчета основных параметров ЗТМ, в которой происходит расчет действующего сопротивления движению, сопротивления уклона местности [4], если таковой задан.

момент сопротивления на валу двигателя, определяется режим работы двигателя. Для осуществления вышеописанных расчетов используются блоки арифметических операций и релейный блок, определяющий, на каком участке регуляторной характеристики работает двигатель в каждый момент времени.

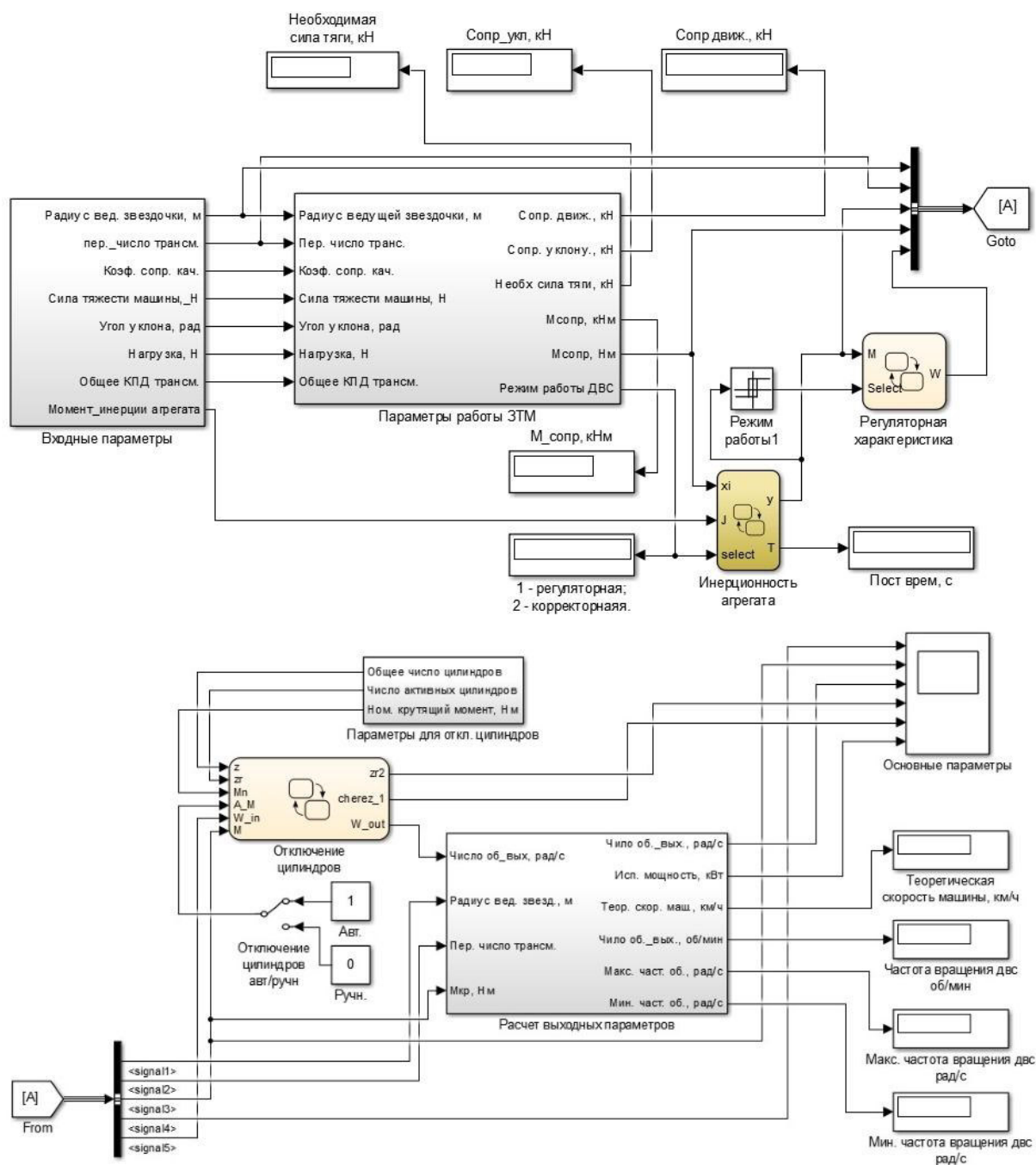


Рис. 1. Имитационная модель рабочего процесса бульдозера Б-10М с системой автоматического отключения цилиндров в среде Matlab Simulink

Инерционность машины и регуляторная характеристика

Подмодель, имитирующая влияние инерционности агрегата на крутящий момент двигателя построена с использованием событийного моделирования Stateflow. Модель позволяет, используя данные о моменте инерции агрегата, вычислять постоянную времени, и имитируя инерционность, производить сглаживание момента сопротивления на валу двигателя в зависимости от режима работы двигателя [3, 5] (в подмодели инерционности реализуется с помощью блоков, ответственных за корректорную или регуляторную ветвь характеристики). Подмодель регуляторной характеристики необходима для моделирования нелинейности в работе дизельного двигателя. Для построения данной модели также использована среда событийного моделирования Stateflow в составе программного пакета Matlab Simulink, которая позволяет создавать модели, в которых присутствует нелинейность. На выходе модели - частота вращения коленчатого вала двигателя, которая зависит от значения крутящего момента на входе модели и режима работы двигателя. Подробное описание этих звеньев содержится в [5].

Система автоматического отключения числа работающих цилиндров

Подмодель автоматического отключения числа работающих цилиндров (рис. 2) определяет в каждый момент времени оптимальное число работающих цилиндров двигателя. Система, основываясь на значении момента сопротивления, приведенного к коленчатому валу двигателя, производит расчет оптимального режима работы двигателя, проводит анализ на целесообразность отключения цилиндра (отключение происходит при снижении фактического момента сопротивления, соответствующего работе двигателя в режиме неполной загрузки двигателя, когда имеются резервы мощности, когда значение момента сопротивления меньше номинального на определенную, заложенную в алгоритме величину) или его включения в зависимости от изменяющейся в течении

времени нагрузки. Система имеет ограничение на максимальное количество одновременно отключенных цилиндров - не более половины от общего числа цилиндров [6]. Также в систему встроен алгоритм, позволяющий системе производить отключение цилиндра через цикл, т.е. в выбранном цилиндре отключается топливоподача каждый второй раз, таким образом повышается точность управления мощностью двигателя. Предлагается при отключении части цилиндров реализовать способ отключения, при котором номер отключенного цилиндра меняется с каждым циклом, что позволит равномерно распределить износ двигателя, а также снизить эффект разности температур различных цилиндров вследствие их неравномерной работы при отключении.

Подмодель расчета выходных параметров производит расчет теоретической скорости машины, используемой мощности, текущей частоты вращения коленчатого вала двигателя, минимальной и максимальной частот вращения коленчатого вала двигателя за моделируемый промежуток времени. Апериодическое звено используется для моделирования инерционности при отключении или включении цилиндра.

Результаты моделирования

Осциллограммы выходных значений модели представляют собой графики изменения во времени следующих параметров (на рис. 3 показаны сверху вниз): момент сопротивления на валу двигателя, Нм; крутящий момент двигателя, Нм; частота вращения коленчатого вала двигателя, рад/с; число активных в данный момент цилиндров; режим отключения цилиндров через цикл (значение равно 1 соответствует активному режиму отключения цилиндров через цикл, 0 – отключенному). Например, если число активных цилиндров равно 3 и отключение через цикл активно, т.е. равно единице, то это означает, что постоянно работают два цилиндра, третий работает через цикл, четвертый не работает и т. д.). На нижнем графике рисунка 3 изображено изменение во времени используемой мощности двигателя, кВт.

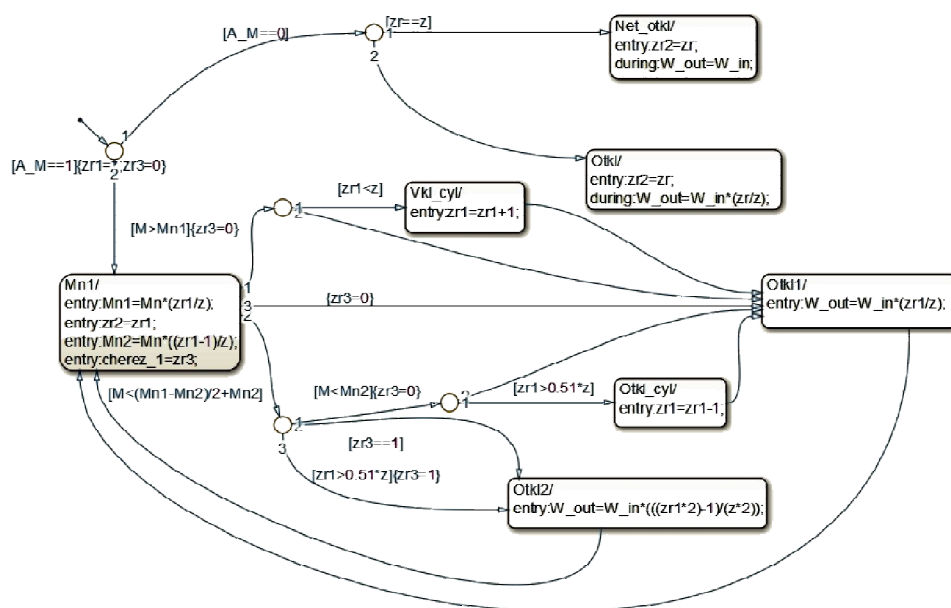


Рис. 2. Подмодель автоматической системы отключения цилиндров, созданная с помощью пакета Stateflow Matlab Simulink.

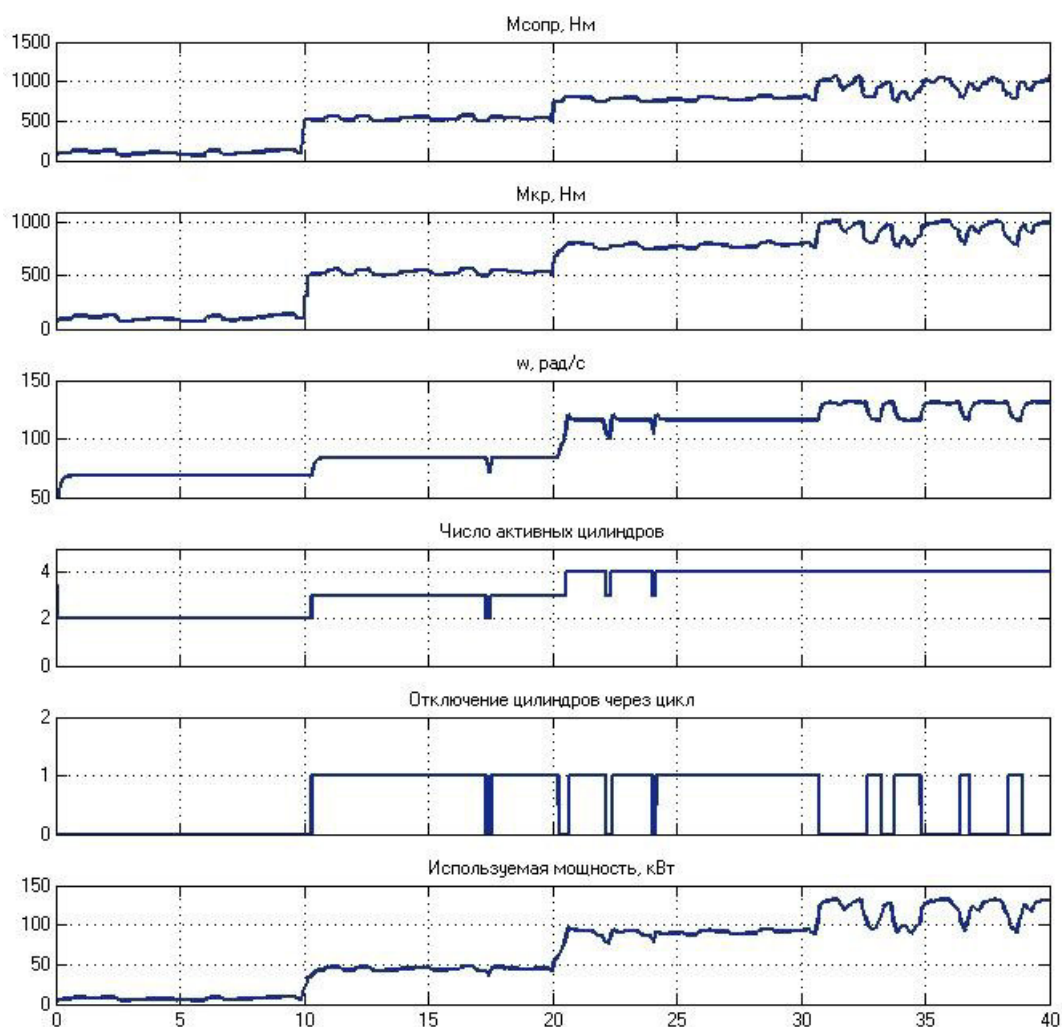


Рис. 3. Осциллограммы выходных параметров модели

Весь период моделирования длится 40 секунд и условно поделен на 4 отрезка, длительностью 10 секунд каждый. На каждом из отрезков задается различная нагрузка, действующая на двигатель бульдозера. Так, например, на интервале 0-10 секунд нагрузка на рабочем органе незначительная и общее сопротивление складывается в основном из сопротивления движению бульдозера. Этот интервал моделирует холостое движение бульдозера (возвращение к началу рабочего хода), при этом момент сопротивления, приведенный к валу двигателя составляет примерно 70-100 Нм. При этом режиме работы бульдозера система автоматического отключения цилиндров производит отключение двух цилиндров (отключение большего числа цилиндров может привести к нестабильной работе двигателя), т. о. при холостом ходе бульдозера (движение без разработки грунта) постоянно отключены 2 из 4 цилиндров. Номера отключаемых цилиндров должны меняться с каждым новым циклом для устранения неравномерности износа и температуры. Частота вращения при этом режиме работы составляет около 70 рад/с, при развиваемой двигателем мощности 5-9 кВт. На втором интервале момент сопротивления составляет примерно 500-550 Нм, это соответствует режиму работы бульдозера при частично загруженном двигателе, на практике обычно соответствующем режимам планирования и перемещения небольшого количества грунта. На этом режиме постоянно работают два цилиндра, третий работает через цикл, четвертый не работает. Частота вращения коленчатого вала около 80-85 рад/с, двигатель при этом развивает мощность 42-48 кВт. На третьем интервале момент сопротивления составляет 750-800 Нм, что соответствует перемещению призмы волочения при одновременном вырезании небольшого объема грунта, компенсирующего потери через боковые кромки отвала при транспортировке. На этом режиме практически всегда требуется полная мощность двигателя, однако в некоторые промежутки времени при уменьшении сопротивления система автоматического отключения цилиндров производит отключение одного цилиндра через цикл, оптимизируя работу двигателя согласно действующей нагрузке. Частота вращения на этом режиме около 116-118 рад/с, используемая мощность двигателя 88-92 кВт. На четвертом интервале момент

сопротивления примерно соответствует номинальному крутящему моменту двигателя, двигатель работает на полную мощность, момент сопротивления 800-1050 Нм, работают все цилиндры постоянно. Иногда, при кратковременном резком повышении нагрузки двигатель на короткий промежуток времени переходит на корректорный участок регуляторной характеристики двигателя. Частота вращения коленчатого вала двигателя составляет 90-130 рад/с, используемая мощность варьируется от 95 до 130 кВт.

Вывод

В целом, анализируя результаты работы имитационной модели гусеничного бульдозера Б-10М с системой автоматического отключения цилиндров, следует отметить, что при отключении одного или нескольких цилиндров происходит уменьшение числа оборотов коленчатого вала, т.к. момент сопротивления остается прежним, но при этом мощность снижается. Улучшаются топливно-экономические характеристики, однако уменьшается рабочая скорость. С другой стороны, при определенных видах земляных работ высокая скорость снижает качество разработки грунта. Поэтому на ЗТМ при некоторых видах работ, предусматривающих работу на режимах с неполной загрузкой двигателя, существует ограничение на максимальную рабочую скорость. Существует альтернативный путь понижения мощности при помощи сокращения подачи топлива во все цилиндры с помощью рейки топливного насоса (на ДВС с рядными механическими ТНВД) или программного управления в сторону уменьшения количества впрыскиваемого топлива во все цилиндры с помощью микроконтроллера (ДВС, оснащенные системой Common Rail). Однако при этом способе изменяется оптимальный состав топливно-воздушной смеси, повышается износ деталей двигателя. Использование же системы автоматического отключения цилиндров уменьшает трение и износ в деталях ДВС за счет полного отключения работы цилиндра. Также контроль за снижением количества впрыскиваемого топлива осуществляет оператор машины, который не всегда точно может рассчитать и предугадать нужное количество топлива, необходимого в данный момент, что делает этот способ зависимым от фактора квалифицированности оператора. При автоматическом отключении цилиндров

нужный алгоритм рассчитывается компьютером исходя из текущих показаний датчиков.

Библиографический список

1. Дьяконов, В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс. – 2003. – 576 с.
2. Мещеряков, В.А. Математическое моделирование рабочих процессов дорожных и строительных машин: имитационные и адаптивные модели: монография / В.А. Мещеряков, А.М. Завьялов, М.А. Завьялов, В.Н. Кузнецова. – Омск: СибАДИ, 2012. – 408 с.
3. Денисов, В.П. Исследование статистических характеристик показателей рабочего процесса землеройно-транспортных машин с учетом нелинейностей в структуре их математических моделей / В.П. Денисов, В.А. Мещеряков // Машины и процессы в строительстве: Сб. науч. тр. № 5 – Омск: Изд-во СибАДИ, 2004. – С. 237–243.
4. Добронравов, С.С. Строительные машины и основы автоматизации: Учеб. для строит. вузов / С.С. Добронравов, В.Г. Дронов. – М.: Высшая школа, 2001. – 575 с.
5. Денисов В.П. Математическое моделирование рабочего процесса автогрейдера для оптимизации длины отвала при случайном характере нагрузок / В.П. Денисов, К.В. Зубарев, С.С. Журавлев. // Вестник СибАДИ. – 2014. – №3. – С. 72–78.
6. Федосеев, С.Ю. Повышение топливной экономичности тракторно-транспортного агрегата отключением части цилиндров двигателя: дис... канд. техн. наук / С.Ю. Федосеев. – Челябинск, 2015. – 156 с.

IMITATION MODEL OF EARTHMOVING MACHINERY WORKFLOW WITH AUTOMATIC SYSTEM OF CYLINDER ENGINE DEACTIVATE

S.S. Zhuravlev, K.V. Zubarev

Abstract. The article considers the simulation model of workflow Earthmoving machinery, feature of the model is the presence of an automatic system cylinders deactivate of the engine depending on operating the machine load detail components of the model, obtained by simulation data built waveform, their analysis, evaluated the impact of the deactivated of cylinders in the working process of the unit.

Keywords: earthmoving machinery, engine, simulation model, deactivating the cylinder, optimization.

References

1. Dyakonov V.P. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 v matematike i modelirovanii [MATLAB 6 / 6.1 / 6.5 + Simulink 4/5 in mathematics and modeling]. Polnoye rukovodstvo pol'zovatelya. Moscow, SOLON-Press. 2003. 576 p.
2. Meshcheryakov V.A., Zav'yalov A.M., Zav'yalov M.A., Kuznetsova V.N. Matematicheskoye modelirovaniye rabochik protsessov dorozhnykh i stroitel'nykh mashin: imitatsionnyye i adaptivnyye modeli [Mathematical modeling of workers processes earthmovers machinery: simulation and adaptive model]. Omsk: SibADI, 2012. 408 p.
3. Denisov V.P., Meshcheryakov V.A. Issledovaniye statisticheskikh kharakteristik pokazateley rabocheho protsessa zemleroyno-transportnykh mashin s uchetom nelineynostey v strukture ikh matematicheskikh modeley [Research of the statistical characteristics of indicators workflow earthmovers considering nonlinearities in the structure of their mathematical models] *Mashiny i protsessy v stroitel'stve: Sb. nauch. tr.*, no 5, Omsk: Izd-vo SibADI, 2004. pp. 237–243.
4. Dobronravov S.S., Dronov V.G. Stroitel'nyye mashiny i osnovy avtomatizatsii: Ucheb. dlya stroit. vuzov [Construction machinery and automation basics: Proc. for the building]. Moscow, Vysshaya shkola, 2001. 575 p.
5. Denisov V.P., Zubarev K.V., Zhuravlev S.S. Matematicheskoye modelirovaniye rabocheho protsessa avtogreydera dlya optimizatsii dliny otvala pri sluchaynom kharaktere nagruzok [Mathematical modeling workflow grader to optimize the length of the blade at the random nature of loads]. *Vestnik SibADI*, 2014, no 3. pp. 72–78.
6. Fedoseyev S.Yu. Povysheniye toplivnoy ekonomichnosti traktorno-transportnogo agregata otklyucheniyem chasti tsilindrov dvigatelya [Improving fuel economy of tractor-vehicle unit by deactivating of the engine cylinders dis. kand. tekhn. nauk]. Chelyabinsk, 2015. 156 p.

Журавлев Сергей Сергеевич (Россия, г. Омск) – аспирант ФГБОУ ВПО «СибАДИ». (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: zhuravliovss@list.ru).

Зубарев Константин Викторович (Россия, г. Омск) – аспирант ФГБОУ ВПО СибАДИ (644080 Россия, г. Омск, пр. Мира 5, e-mail: kv.zubarev@gmail.com).

Zhuravlev Sergey (Russian Federation, Omsk) – graduate student of The Siberian state automobile and highway academy (SibADI). (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: zhuravliovss@list.ru).

Zubarev Konstantin Viktorovich (Russia, Omsk) – postgraduate student of the Siberian State Automobile and Highway Academy "SibADI" (644080, Omsk, Mira ave. 5, e-mail: kv.zubarev@gmail.com).