

УДК 621.865.8:592.6

Об оптимальном управлении гидрообъемно-механическим приводом при разгоне маховика

Корсунский В. А.^{1,*}

^{*}vakomngtu@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

С помощью разработанной математической модели получено решение оптимальной зарядки маховика при стоянке гусеничной машины оснащенной комбинированной энергетической установкой, содержащей двигатель внутреннего сгорания и маховичный аккумулятор энергии. Выполнена оценка влияния параметров относительной энергоемкости маховика и гидрообъемномеханического привода, содержащего одну регулируемую гидромашину, на время зарядки маховика. Установлены причины, ограничивающие эффективность действия комбинированной энергетической установки в процессе разгона маховика до максимальной скорости. Полученные результаты позволяют определять параметры маховика и законы управления приводом с целью их дальнейшей оптимизации.

Ключевые слова: комбинированная энергетическая установка, гидрообъемномеханический привод, маховичный аккумулятор энергии, энергоемкость маховика, зарядка маховика, механическая трансмиссия

Актуальность проблемы

Одним из путей повышения динамических качеств транспортных машин и улучшения топливной экономичности является применение комбинированной энергетической установки (КЭУ), состоящей из основного источника энергии – двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с достигнутым уровнем мощности и вспомогательного источника энергии – аккумулирующего устройства (маховика) [1].

Так как маховик при разгоне машины с КЭУ должен обладать полным (или достаточным) запасом энергии, то представляет интерес время зарядки аккумулятора t_z , т.е. время, необходимое до достижения маховиком максимальной угловой скорости $\omega_{\text{м max}}$ или энергоемкости $E_{\text{м max}}$.

При отсутствии зарядки, т.е. при нераскрученном маховике машина с КЭУ, использующая ДВС такой же установочной мощности как у обычной машины, будет иметь одинаковые динамические качества, либо будет проигрывать последней при разгоне. Это свя-

зано с тем, что время t_3 , затрачиваемое на зарядку маховика, увеличит общее время разгона машины с КЭУ при одинаковых условиях движения.

Поэтому необходимо с максимальным быстродействием обеспечить полную или достаточную для разгона транспортной машины зарядку маховика при кратковременных перерывах в работе или на стоянках. Нахождение максимального быстродействия при зарядке маховика связано с решением задачи оптимального управления приводом маховичного аккумулятора энергии (МАЭ).

Постановка задачи

Известные схемы КЭУ обладают одним существенным недостатком – они имеют зависимость от скоростного режима ДВС отдачу энергии, не позволяя стабилизировать его работу и повысить загрузку. Чтобы устранить этот недостаток, необходимо выполнять привод маховика бесступенчатым и регулируемым. Кроме того, поскольку энергия, высвобождаемая при торможении машины, перетекает от ведущих колес к маховику, а при разгоне машины – в обратную сторону, необходимо обеспечить обратимость передачи.

Ограниченность объема моторно–трансмиссионных отделений транспортных машин требует применения в качестве привода МАЭ компактных устройств. Проведенный анализ различных передач: механической, электрической, гидрокинетической и гидростатической показал, что для привода МАЭ наиболее подходят электрическая и гидростатическая [2].

Резко переменные условия работы транспортных, в особенности гусеничных машин, заставляют отдать предпочтение гидрообъемным передачам (ГОП), которые хорошо переносят перегрузки. Благодаря высокому давлению и быстроходности современные ГОП имеют удельную массу 0,2 – 0,4 кг/кВт.

Привод МАЭ может быть выполнен однопоточным (когда весь поток мощности проходит через гидрообъемную передачу) или двухпоточным (когда мощность передается как по гидравлической, так и по механической ветвям). Одним из недостатков однопоточного привода МАЭ является его низкий КПД. Поэтому, с целью повышения КПД привода МАЭ предполагается его выполнять двухпоточным, что будет способствовать также повышению эффективности всей системы.

Использование только одной регулируемой гидромашины в составе двухпоточной передачи привода МАЭ позволяет уменьшить габариты и вес системы. Кроме того, так как требуемый рабочий диапазон привода МАЭ равен 2 ... 3 (при отборе от маховика 75 ... 89 % энергии), то он может полностью быть обеспечен одной регулируемой гидромашинной.

Описание динамики управляемого движения транспортной машины, оснащенной КЭУ, содержащей маховичный аккумулятор энергии (МАЭ) с бесступенчатым приводом, требует непрерывного представления полученных экспериментально дискретных значений статической характеристики ДВС. Исследуя возможные режимы поведения машины с КЭУ в динамике, необходимо учитывать всю область допустимых режимов работы ДВС, которая ограничивается внешней скоростной, регуляторной и тормозной ветвями характеристики. Поэтому должны быть заданы статистические характеристики ДВС – крутящий

момент на валу двигателя M_d от его угловой скорости ω_d и от положения органа управления (топливоподачи) u_d . Полученные в результате эксперимента или теоретические дискретные данные аппроксимируются и представляются обычно функцией двух переменных, т.е. $M_d = M_d(\omega_d; u_d)$ [1].

При решении задачи оптимального управления зарядкой МАЭ на стоянке время выхода двигателя на внешнюю характеристику t_d выбирается исходя из его разгонных характеристик. Например, для двигателя ГАЗ-53А время выхода его на внешнюю характеристику без нагрузки составляет около 0,9 с.

Кинематическая схема машины с механической трансмиссией и с гидрообъемномеханическим приводом к МАЭ

На рис. 1 представлена кинематическая схема гусеничной машины (ГМ) с КЭУ и механической трансмиссией [3]. Маховик 1 с гидрообъемномеханическим приводом (ГОМП) 2 чаще всего устанавливают на входном валу 3 механической трансмиссии (коробки) 4 параллельно основному двигателю (ДВС) 5 машины. Для уплотнения компоновки привод может содержать три гидравлические связанные гидрообъемные передачи (ГОП), каждая из которых состоит из регулируемого насоса 6 и нерегулируемого гидромотора 7, соединенных трубопроводами. Привод и гидромашины приводятся в движение от ДВС через фрикцион 8 и муфту 9 привода МАЭ. Таким образом, КЭУ через механическую трансмиссию связывается с ведущими колесами 10 транспортной машины. Для уменьшения аэродинамических потерь маховик помещается в камеру 11 с небольшим разрежением (вакуумом). Электромагнитная муфта 12 служит для консервации энергии при длительной стоянке ГМ. Отметим, что при зарядке МАЭ на стоянке, в механической трансмиссии машины устанавливается нейтраль.

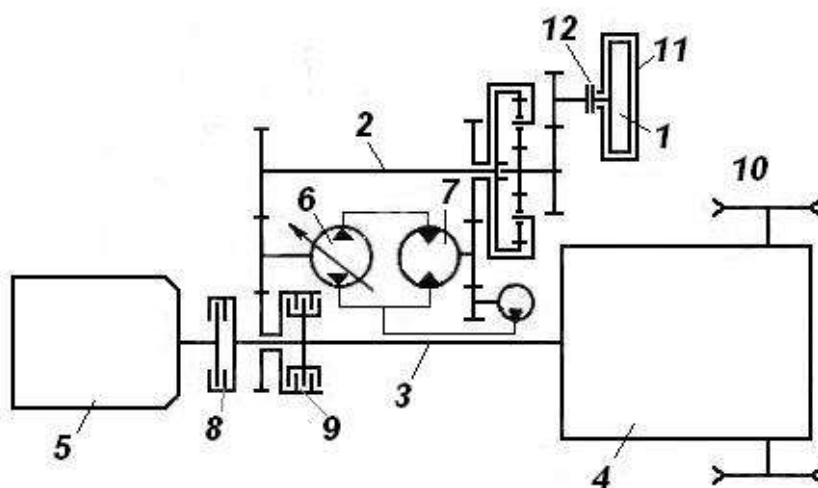


Рис. 1. Кинематическая схема машины оснащенной механической трансмиссией и КЭУ, снабженной гидрообъемномеханическим приводом к маховику. 1 – маховичный аккумулятор энергии (МАЭ); 2 – гидрообъемномеханический привод; 3 – входной вал трансмиссии; 4 – механическая трансмиссия; 5 – ДВС; 6 – регулируемый гидронасос; 7 – нерегулируемый гидромотор привода МАЭ; 8 – фрикцион ДВС; 9 – муфта привода МАЭ; 10 – ведущие колеса машины; 11 – камера маховика; 12 – электромагнитная муфта маховика.

Математическая модель машины с механической трансмиссией и ГОМП привода МАЭ

Из-за наличия упругих с проскальзыванием связей между гидромашинами система уравнений, описывающих зарядку МАЭ на стоянке, имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} J_d \dot{\omega}_d &= M_d(\omega_d; u_d) - M_{1м}(\omega_d; p_m; u_{1м})/i_{д1м} - M_{стр}(\omega_{тр}; p_{тр хх}), \\ J_m \dot{\omega}_m &= M_{2м}(\omega_m; p_m)/i_{2м} - M_{см}(\omega_m; p_k), \\ e_m \dot{p}_m &= Q_{1м}(\omega_d; p_m; u_{1м}) - Q_{2м}(\omega_m; p_m). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где J_d и J_m – моменты инерции ДВС и МАЭ; M_d , $M_{1м}$ и $M_{2м}$ – крутящие моменты ДВС, гидронасосов и гидромоторов привода МАЭ соответственно; $M_{стр}$ и $M_{см}$ – приведенный к валу ДВС момент потерь в трансмиссии при холостом ходе и момент потерь от аэродинамического сопротивления на валу МАЭ; $\omega_{тр}$ – угловая скорость вращающихся элементов трансмиссии; ω_m – угловая скорость МАЭ; e_m – приведенный модуль упругости жидкости и стенок трубопроводов привода МАЭ; p_m и p_k – давления в приводе МАЭ и в вакуумной камере; $p_{тр хх}$ – силовые потери в трансмиссии на холостом ходу; $Q_{1м}$ и $Q_{2м}$ – расходы гидронасосов и гидромоторов привода МАЭ; $i_{д1м}$ – передаточное число шестерен от ДВС к гидронасосам привода МАЭ; $i_{2м}$ – передаточное число шестерен от гидромотора привода МАЭ к маховику; $u_{1м}$ – параметр управления приводом МАЭ.

При исследовании процесса оптимальной зарядки маховика при стоянке ГМ пренебрегаем буксованием фрикциона ДВС и муфты привода МАЭ. Потери в трансмиссии $p_{тр}$ представляют собой потери холостого хода.

Статические характеристики ДВС типа ГАЗ-53А – зависимости крутящего момента M_d от угловой скорости ω_d и от параметра управления двигателем u_d получены аппроксимацией экспериментальных данных. Параметр управления u_d в данном случае представляет собой отношение текущего значения угла открытия дроссельной заслонки к максимальному.

Зная требуемую траекторию выхода двигателя на внешнюю характеристику, необходимо отыскать такие изменения параметра управления двигателем u_d , чтобы фактическая траектория как можно точнее была приближена к требуемой.

С момента выхода двигателя на внешнюю характеристику ($t_d = t_n$) увеличение скорости маховика осуществляется только изменением параметра управления привода МАЭ. В частности, при использовании в приводе маховика ГОМП по схеме, приведенной на рис. 1, увеличение скорости маховика достигается изменением параметра гидронасоса $u_{1м}$, причём должно выполняться условие постоянства максимальной мощности двигателя $N_d = N_{d \max} = 84$ кВт.

При этом угловая скорость вала двигателя должна удовлетворять условию

$$\omega_d \Big|_{\substack{N_d = N_{d \max} \\ u_d = 1}} = const. \quad (2)$$

Любое другое управление не обеспечит максимального быстродействия для достижения маховиком скорости $\omega_{\text{м max}}$.

Следовательно, для нахождения оптимального управления приводом МАЭ необходимо обеспечить максимум функционала

$$I = \int_{t_n}^{t_k} M_{\text{мс}} \omega_{\text{м}} dt, \quad (3)$$

где $M_{\text{мс}}$ – суммарный момент действия всех сил, приведенный к валу МАЭ,

$\omega_{\text{м}}$ – текущая угловая скорость маховика,

t_n и t_k – начальное и конечное время зарядки МАЭ.

Для нахождения закона управления параметром $u_{1\text{м}}$ при зарядке маховика на стоянке, необходимо решить систему уравнений (1) численным методом.

Результаты расчета и их анализ

На рис. 2 приведены результаты моделирования зарядки (разгона) МАЭ при стоянке ГМ. Задача решалась с помощью ПЭВМ методом Ньютона – Рафсона при следующих значениях параметров системы:

$$J_{\text{м}} = 0,96 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \omega_{\text{м max}} = 2094 \text{ рад/с}, \omega_{\text{д Nmax}} = 324 \text{ рад/с}, p_{\text{м max}} = 40 \text{ МПа}.$$

Относительная энергоёмкость МАЭ была принята равной 4 кЭн [1].

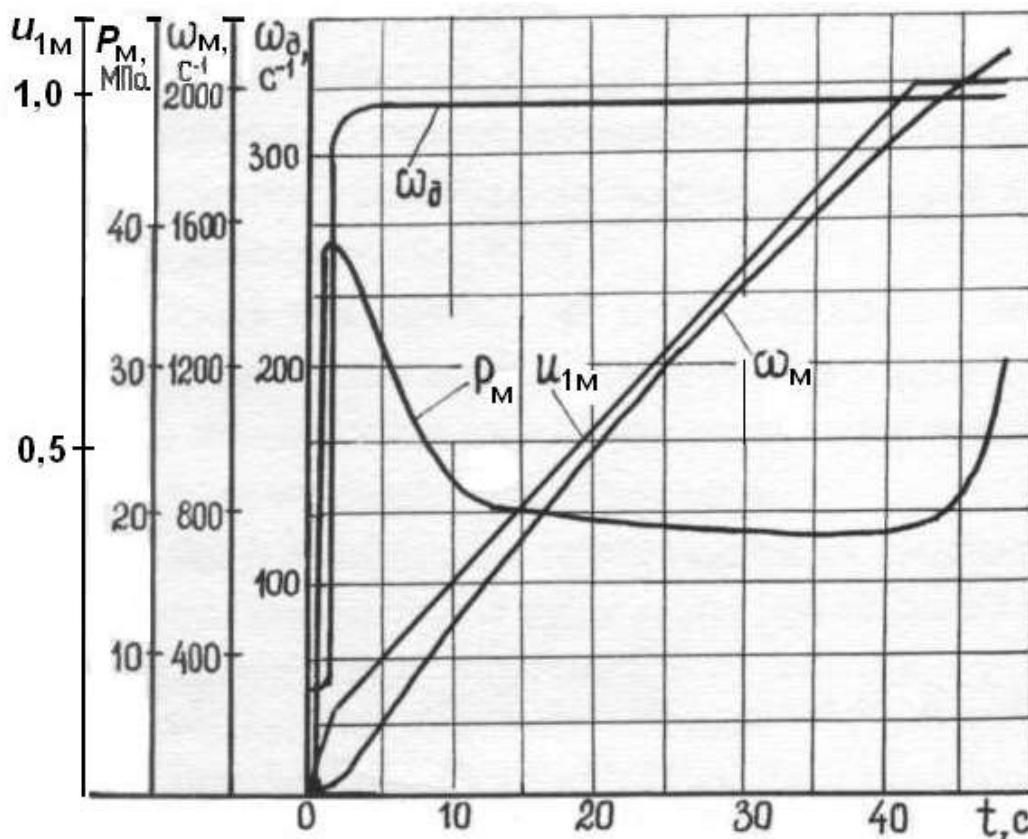


Рис. 2. Изменение параметров привода МАЭ и маховика с относительной энергоёмкостью $E_0 = 4$ кЭн

Необходимо отметить, что чрезмерно интенсивное управление параметром управления привода МАЭ приводит к перегрузке и остановке ДВС (рис. 3).

Медленное изменение параметра управления u_{1M} способствует превышению угловой скорости $\omega_{д Nmax}$, соответствующей максимальной мощности ДВС и интенсивность разгона будет определяться перепадом давления p_m в ГОП привода МАЭ.

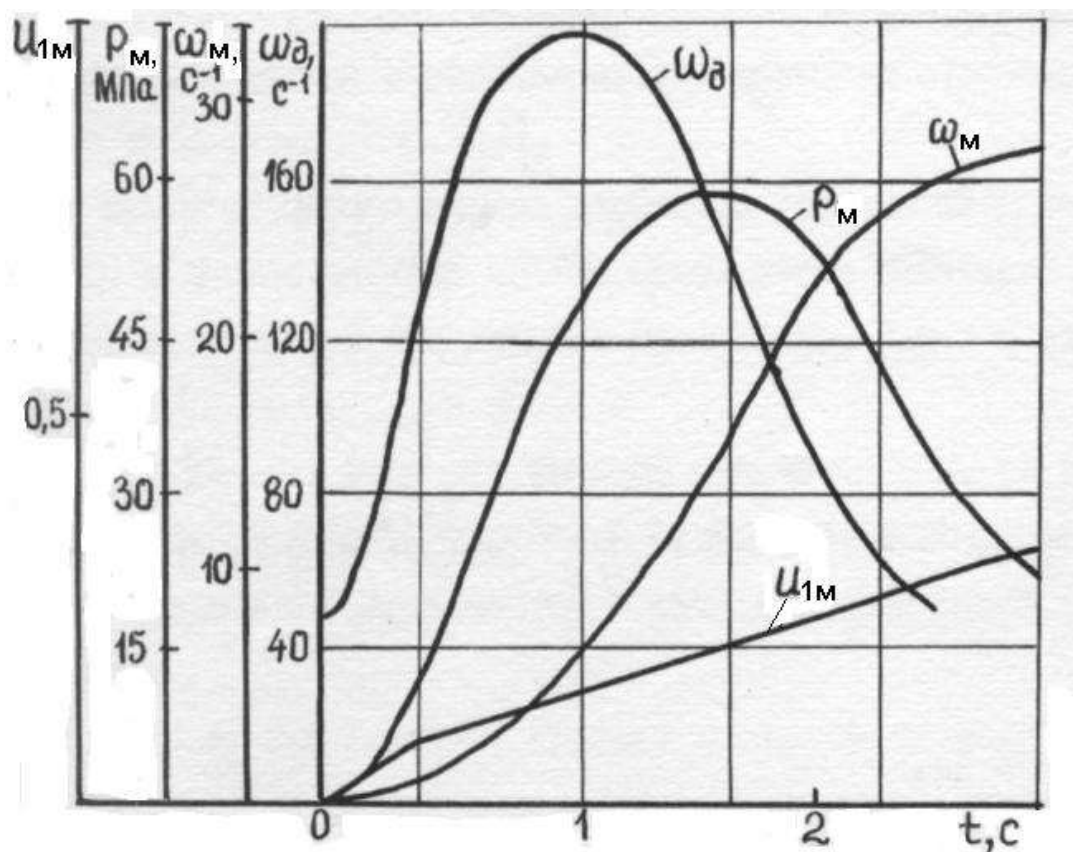


Рис. 3. Изменение параметров привода МАЭ и маховика с относительной энергоёмкостью $E_0 = 4$ кэВ при не оптимальном управлении

Закон изменения параметра управления u_{1M} во времени был получен в следующем виде:

$$u_{1M} = a_0 \cdot t_n + a_1 \cdot t_1 + a_2 \cdot (t_2 - t_1) + a_3 \cdot (t_3 - t_2) + a_4 \cdot t_4, \quad (4)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты пропорциональности,

t_n, t_1, t_2, t_3, t_4 – начальные и конечные значения времени на i -м участке управления (рис. 2).

Полученные расчетным путем коэффициенты пропорциональности имели следующие значения:

$$a_0 = 1,0; a_1 = 0,133; a_2 = 0,0866; a_3 = 0,0226; a_4 = 1,0.$$

Отметим, что полученный закон управления приводом МАЭ не противоречит оптимальному управлению объектом по ускорению $u = \dot{\omega}$, решение которого приведено в работе [4].

Полное время, необходимое для зарядки МАЭ с максимальной относительной энергоёмкостью $E_0 = 4$ кэВ (или $E_{\text{м max}} = 2,08$ МДж), составляет 48,9 с.

Для маховиков с меньшей относительной энергоёмкостью это время несколько уменьшается. Например, для $E_0 = 2$ кэВ оно составит 42,1 с.

После того, как маховик достиг максимальной угловой скорости $\omega_{\text{м max}}$ транспортная машина с КЭУ может начать разгон. Движение машины можно начинать и при неполной зарядке маховика, т.е. при меньшем значении его угловой скорости $\omega_{\text{м}}$. Однако, в этом случае при небольшом значении E_0 его максимальной энергии может быть недостаточно и разгон машины при этом будет менее интенсивным.

Выводы

1. Факторами, ограничивающими быстродействие системы ДВС – МАЭ, являются максимальная мощность двигателя (или его перегрузка), а также установочная мощность и максимальное давление гидромашин привода маховика.
2. Полученный численным решением на ЭВМ кусочно-линейный закон управления приводом МАЭ во времени позволяет минимизировать время зарядки маховика.

Список литературы

1. Корсунский В.А. Анализ динамических качеств транспортной машины с комбинированной энергетической установкой и с гидрообъёмной трансмиссией. Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 9. С.145-162. DOI: [10.7463/0913.0602200](https://doi.org/10.7463/0913.0602200)
2. Забавников Н.А., Корсунский В.А., Герасимов А.Н. Динамика гусеничной машины с маховичным аккумулятором энергии: учебное пособие. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1987. 44 с.
3. Корсунский В.А. Динамические качества гусеничной машины с комбинированной энергетической установкой и механической трансмиссией при разгоне. Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/articles/983/html>.
4. Батенко А.П. Управление конечным состоянием движущихся объектов. М.: Советское радио. 1977. 256 с.

On the Optimally Controlled Hydrostatic Mechanical Drive in Case of Flywheel Acceleration

V.A. Korsunskii^{1,*}

^{*}vakomngtu@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: combined power installation, hydro volumetric mechanical drive, flywheel energy storage, power consumption of a flywheel, flywheel charge, mechanical transmission

An improving dynamic quality of vehicles and enhanced fuel efficiency are gained thanks to the combined power system (CPS), comprising a main energy source - internal combustion engine (ICE) with an attained level of the power source - and an auxiliary energy source, i.e. an energy storage device (a flywheel).

To solve this problem was developed a mathematical model of CPS comprising internal combustion engine and flywheel energy storage (FES) with stepless drive.

The stepless drive of the flywheel is made to be hydrostatic mechanical to raise the system efficiency. To reduce the drive weight and simplify the control system in the hydraulic part of the flywheel drive is used only one hydraulic unit being controlled.

The paper presents a kinematic diagram of the track-type vehicle equipped with the CPS that has a hydrostatic mechanical drive of the flywheel and a mechanical transmission.

A mathematical model of the system comprising an ICE, hydrostatic mechanical drive, and FES with stepless drive has been developed. This mathematical model was used to study the influence of ICE and flywheel drive parameters on the dynamic characteristics of the system.

The paper estimates the impact of flywheel energy consumption, pressure in the hydraulic system, and control parameter of hydrostatic mechanical drive on the charging time of FES.

The obtained piecewise linear law to control the regulation parameter of the hydraulic unit allows us to minimize the charging time of the flywheel at the short-term stops and in the parking area of a tracked vehicle equipped with a CPS.

The causes affecting the performance of 'ICE – drive – flywheel' system in the course of the flywheel acceleration are a restricted maximum power of the engine, as well as a limited generating capacity, and a maximum flywheel drive hydro-system pressure.

The obtained results allow us to determine rational parameters of the flywheel and the laws of drive control to provide their further optimization, with a tracked vehicle being in motion, under random external effect.

References

1. Korsunskiy V.A. Analysis of dynamic characteristics of a transport vehicle with combined power installation and hydrostatic transmission. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, pp.145-162. 2013, no. 9. (in Russian). DOI: [10.7463/0913.0602200](https://doi.org/10.7463/0913.0602200)
2. Zabavnikov N.A., Korsunskiy V.A., Gerasimov A.N. *Dinamika gusenichnoy mashiny s makhovichnym akkumulyatorom energii*. [Dynamics of tracklaying vehicle with flywheel accumulator]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1987. 44 p. (in Russian).
3. Korsunskiy V.A. [Dynamic qualities of the track vehicle with combined power installation and mechanical transmission at dispersal]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 10. Available at: <http://engjournal.ru/articles/983/html> (accessed 05.04.16) (in Russian)
4. Batenko A.P. *Upravlenie konechnym sostoyaniem dvizhushchikhsya ob'ektov* [Moving objects final state control]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1977. 256 p. (in Russian).