

К ВОПРОСУ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА МЕЖКОЛЕСНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛА С ВНУТРЕННЕЙ АВТОМАТИЧНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ БЛОКИРОВКИ

Введение.

При проектировании нерельсовых транспортных средств, предназначенных для эксплуатации, в том числе, в условиях полного бездорожья, вопрос проходимости является одним из ключевых при выборе типа и конструкции движителя и трансмиссии. В последнее время в мире для таких машин просматривается стойкая тенденция к смещению приоритетов в сторону колесного движителя по сравнению с движителем гусеничным. В связи с этим задача повышения проходимости колесных машин в условиях полного бездорожья является актуальной [1].

Анализ последних достижений и публикаций.

Вопросам распределения мощности между колесами и мостами в современных автомобилях уделено много внимания в научной и технической литературе. Существует большое количество публикаций и просто описывающих работу различных типов дифференциалов [2–7], и рассматривающих научный подход к определению их оптимальных характеристик [1, 8–14]. Однако в большинстве случаев при анализе дифференциалов для автомобилей, работающих в тяжелых дорожных условиях и на бездорожье, рассматриваются вопросы собственно проходимости без учета влияния МКД на управляемость и расход топлива. В работах [15–18] рассмотрены также вопросы эффективности использования дифференциальных приводов в первую очередь для полноприводных автомобилей. Особенно интенсивно в этом направлении работает научная школа Южно-Уральского государственного университета (Россия) во главе с Андреем Келлером.

Однако комплексного сравнительного анализа влияния конструкции МКД и коэффициентов пропорциональности блокирующего момента на экономичность и управляемость полноприводного автомобиля при криволинейном движении по сухой асфальтированной дороге в литературе найдено не было. Этот вопрос, не смотря на бурное развитие электронных систем управления и индивидуального электропривода, остается актуальным для военной колесной техники и полноприводных автомобилей многоцелевого назначения, в которых по-прежнему обычно используется полная блокировка дифференциалов с ручным управлением.

В работах [1, 8–11] авторами этой публикации был начат цикл исследований, посвященных разработке межколесного дифференциала с внутренней автоматичностью, который бы удовлетворял требованиям и к тяговой проходимости, и к динамике машины и одновременно не препятствовал ее криволинейному движению. В этих исследованиях было установлено, что среди самоблокирующихся дифференциалов повышенного трения наиболее рациональные характеристики имеют дифференциалы, в которых степень блокировки зависит от квадрата разности угловых скоростей полуосей и от нагрузки. Для принятия решения о выборе структуры дифференциала и определения его параметров и были проведены предлагаемые исследования.

© Д.О. Волонцевич, 2019

Цель и постановка задачи

Целью данной работы является определение типа дифференциала с внутренней автоматичностью и его параметров для обеспечения высокой тяговой проходимости и динамики военной колесной машины и одновременно не препятствованию его криволинейному движению.

Основная часть

Ранее одним из авторов этой публикации в работе [9] были определены минимально необходимый рабочий объем шестеренчатого насоса для гидростатической блокировки межколесного дифференциала бронетранспортера БТР-4 и зависимости блокировочного момента и давления от относительных скоростей вращения и диаметра дросселирующих отверстий. Одновременно в докладе [10] и находящейся в редакции Восточно-Европейского журнала передовых технологий статье [11] были разработаны и реализованы методики оценки эффективности дифференциалов по критерию динамики разгона и энергозатрат в сложных дорожных условиях, а также методика оценки сопротивления криволинейному движению полноприводного автомобиля по дорогам с твердым покрытием.

Это позволило в предлагаемой работе методом математического моделирования оценить поведение колесного бронетранспортера БТР-4, оборудованного межколесными дифференциалами с гидростатической блокировкой, в сложных дорожных условиях и на дорогах с твердым покрытием в зависимости от диаметра дросселирующего отверстия в шестеренчатых насосах. На графиках представлены зависимости для диаметров дросселирующего отверстия 1 мм – q_{qw_1} , 2 мм – q_{qw_2} и 3 мм – q_{qw_3} . Так же в работе приведены расчеты для бронетранспортера, оборудованного межколесными дифференциалами с моментом блокировки, зависящим от нагрузки. Для них были рассмотрены коэффициенты пропорциональности k_M , равные 0,2; 0,4 и 0,6. В качестве предельных значений просчитано применение открытого классического конического дифференциала (орен).

На графиках рис. 1 приведены зависимости относительного увеличения времени разгона бронетранспортера от 0 до 10 м/с при условии, когда под левым бортом коэффициент сцепления колес с дорогой отвечает сухому чистому асфальтобетону $\varphi_l = 0,8$, а под правым бортом коэффициент сцепления меняется в разных заездах от $\varphi_r = 0,8$ до $\varphi_r = 0,1$ (обледеневшая дорога).

Средний коэффициент сопротивления движению также менялся в различных заездах от $f_m = 0,02$ (сухой гладкий чистый асфальтобетон для шин с регулируемым давлением) до $f_m = 0,08$ (сухая разбитая грунтовая дорога).

По горизонтальной оси дорожные условия представлены величиной коэффициента сцепления под буксующим бортом в диапазоне от 0,1 до 0,3.

Аналогично на рис. 2 приведены зависимости относительного увеличения энергозатрат на разгон бронетранспортера от 0 до 10 м/с в описанных выше дорожных условиях.

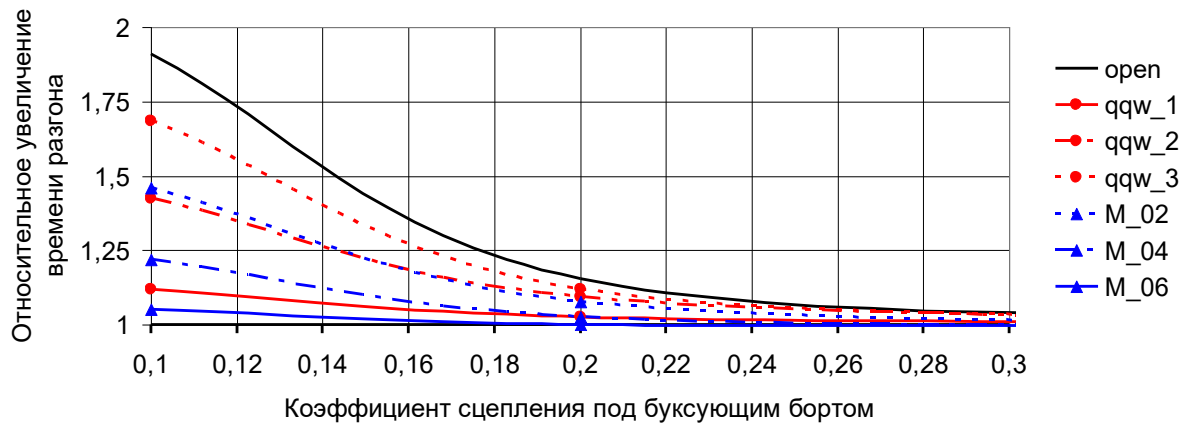
Для каждого из рис. 1 и 2 построено по три графика для среднего коэффициента сопротивления движению 0,02; 0,05 и 0,08.

На рис. 3 представлены графики относительного увеличения мощности, необходимой для движения бронетранспортера с заданным теоретическим радиусом поворота (средним углом поворота управляемых колес первого моста) по дороге с твердым покрытием. Увеличение мощности рассчитывалось по отношению к мощности, необходимой для прямолинейного движения в аналогичных условиях и с той же скоростью.

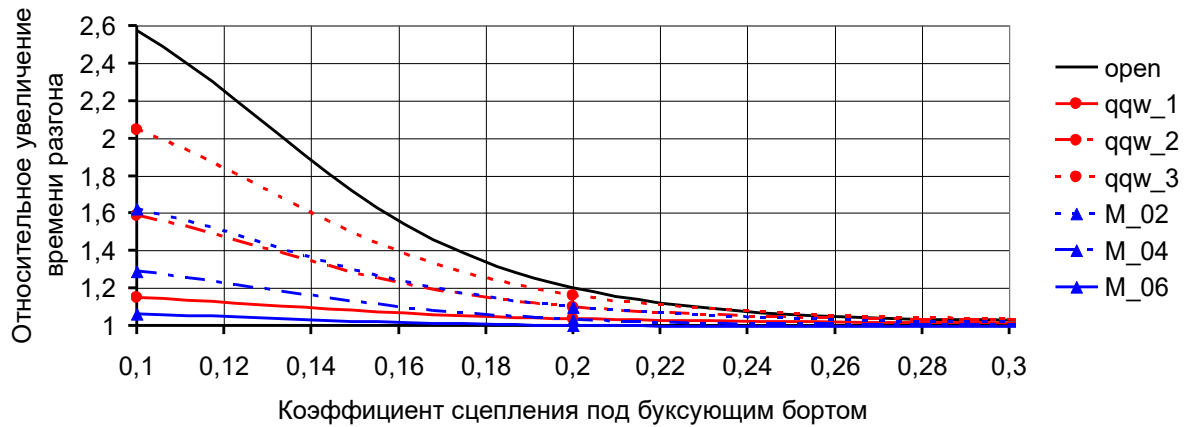
Аналогично на рис. 4 приведены зависимости относительного увеличения действительного радиуса поворота бронетранспортера в описанных выше дорожных усло-

виях по сравнению с теоретически заданным радиусом поворота, рассчитанным без учета увода и проскальзывания колеса в зоне пятна контакта.

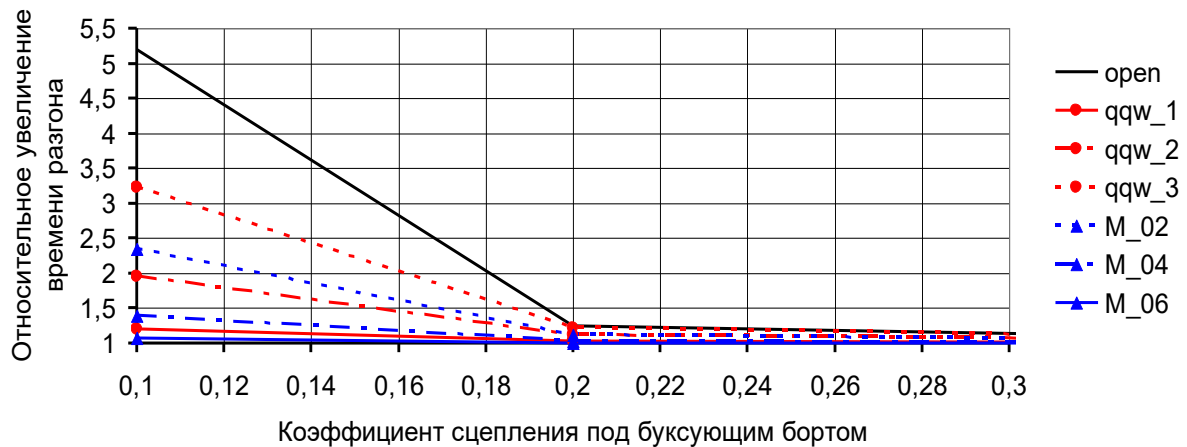
Для каждого из рис. 3 и 4 построено по три графика для среднего угла поворота управляемых колес первого моста в 5° ; 15° и 25° .



а)

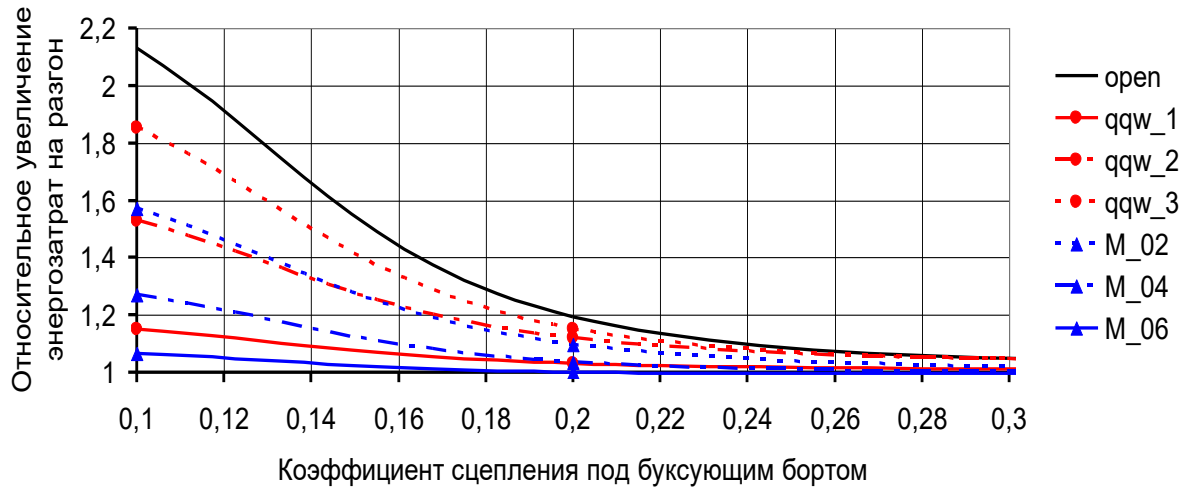


б)

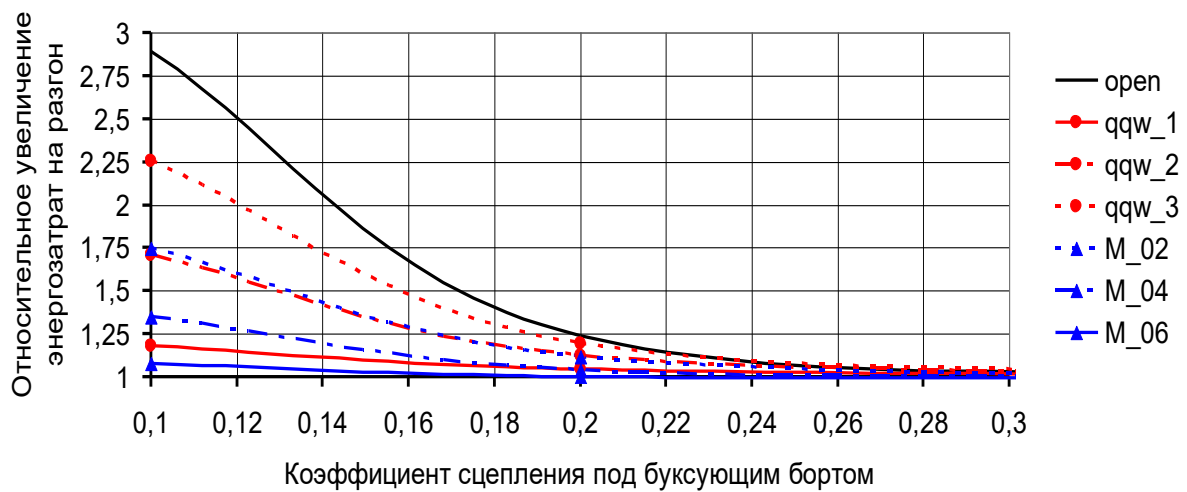


в)

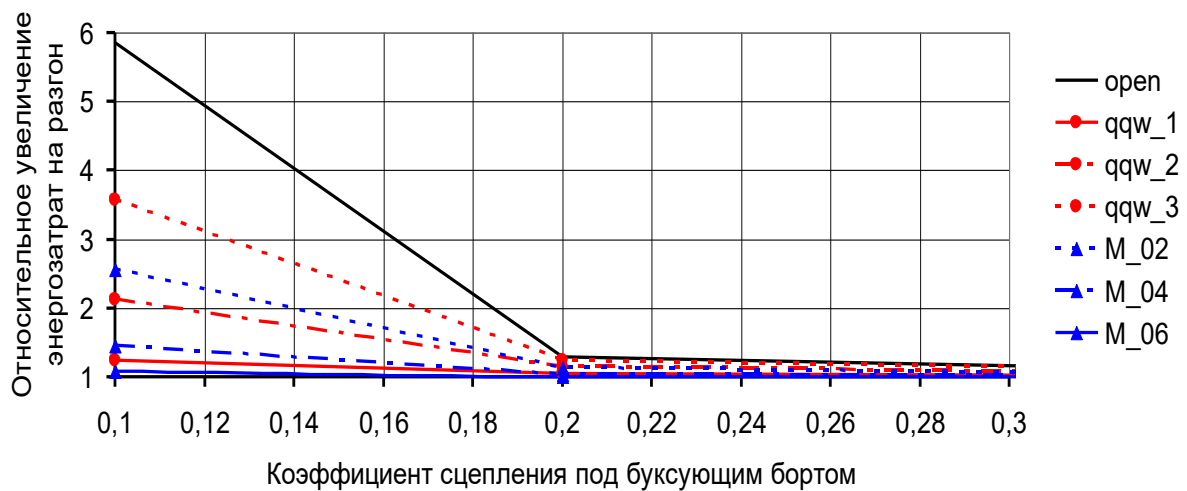
Рис. 1. Зависимость относительного увеличения времени разгона бронетранспортера, оборудованного различными межколесными дифференциалами от коэффициента сцепления колеса с дорогой под буксующим бортом для различных значений среднего коэффициента сопротивления движению: а – $f_m=0,02$; б – $f_m=0,05$; в – $f_m=0,08$



а)

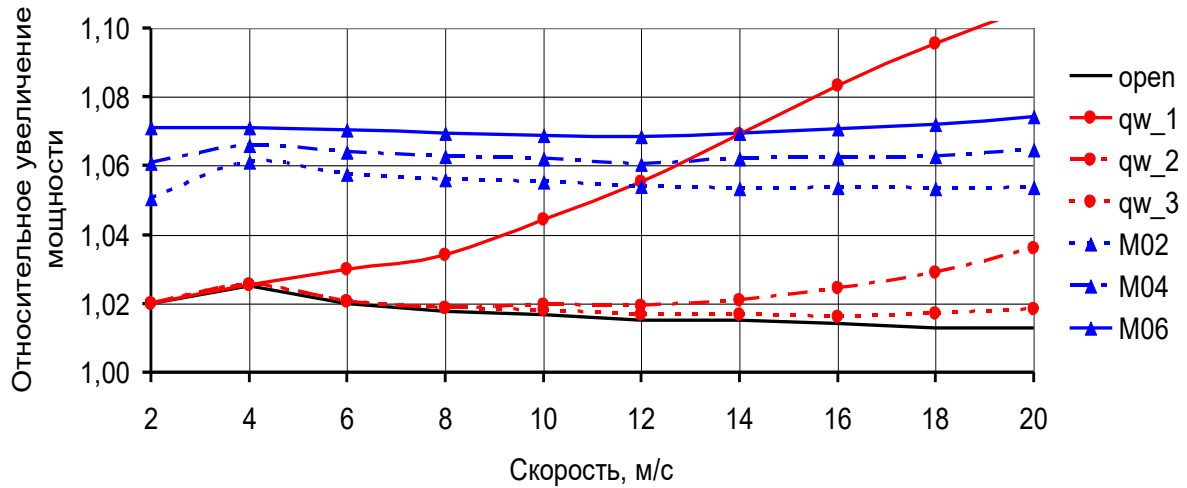


б)

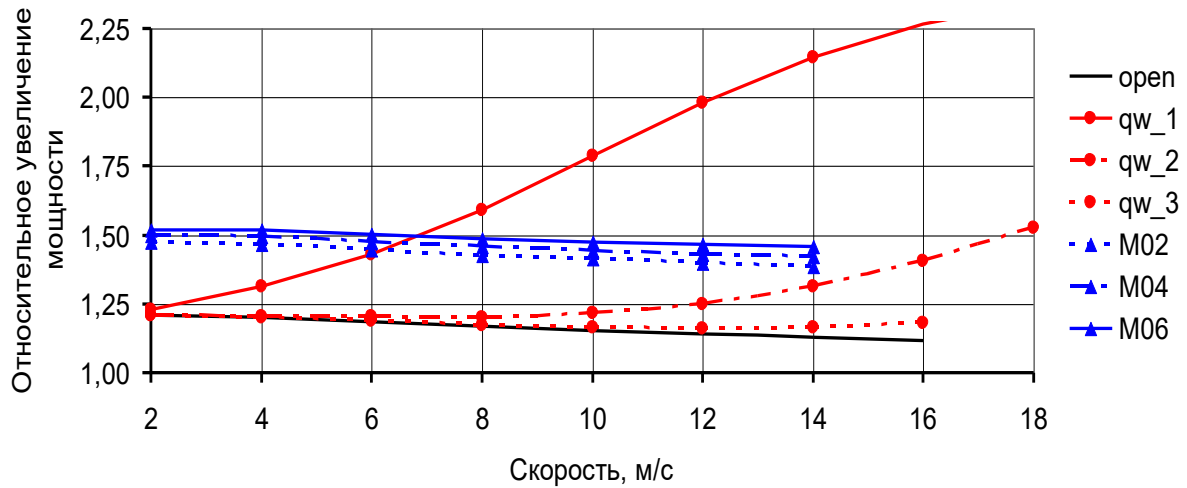


в)

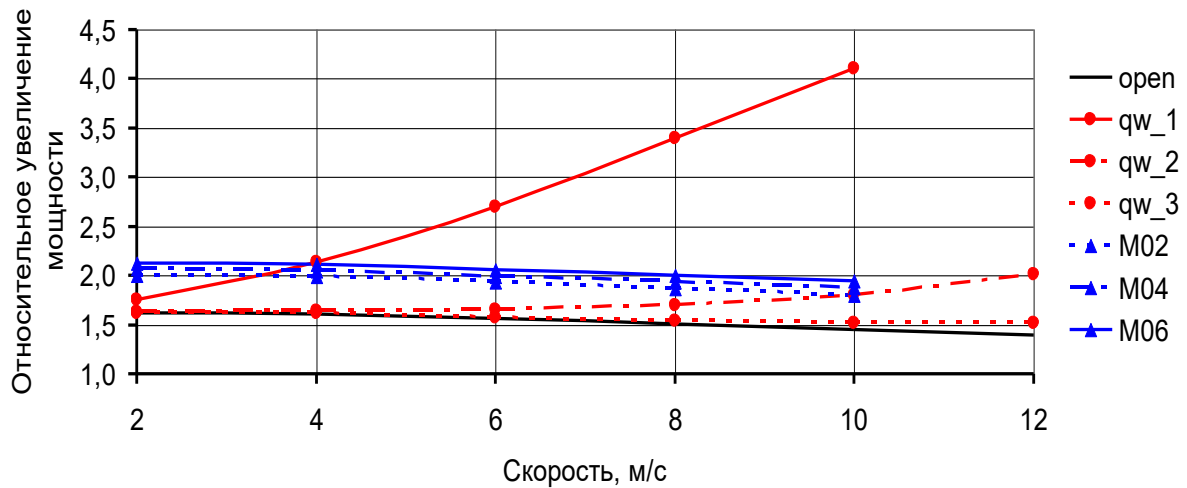
Рис. 2. Зависимость относительного увеличения затрат мощности на разгон бронетранспортера, оборудованного различными межколесными дифференциалами от коэффициента сцепления колеса с дорогой под буксующим бортом для различных значений среднего коэффициента сопротивления движению: а – $f_m=0,02$; б – $f_m=0,05$; в – $f_m=0,08$



а)

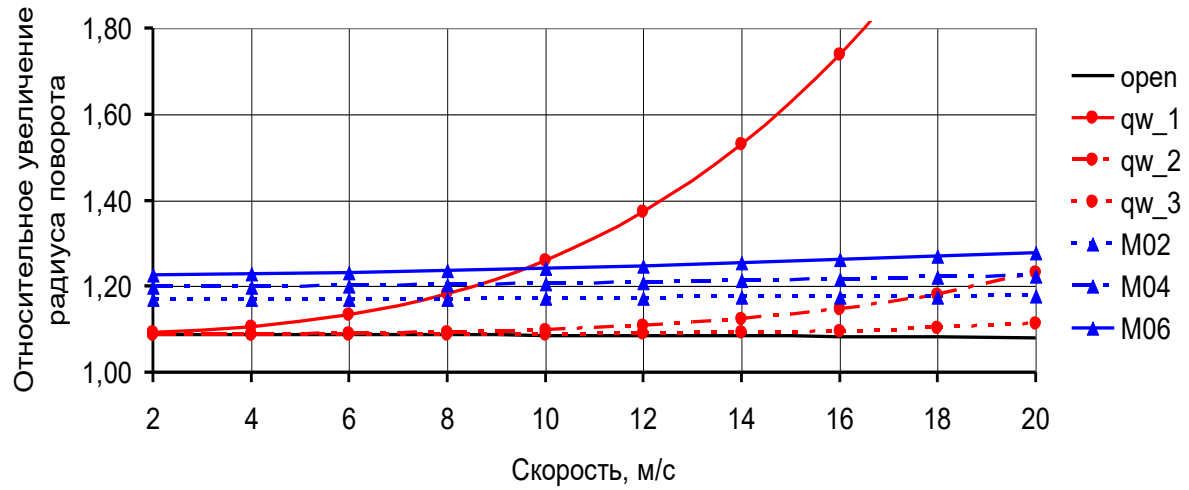


б)

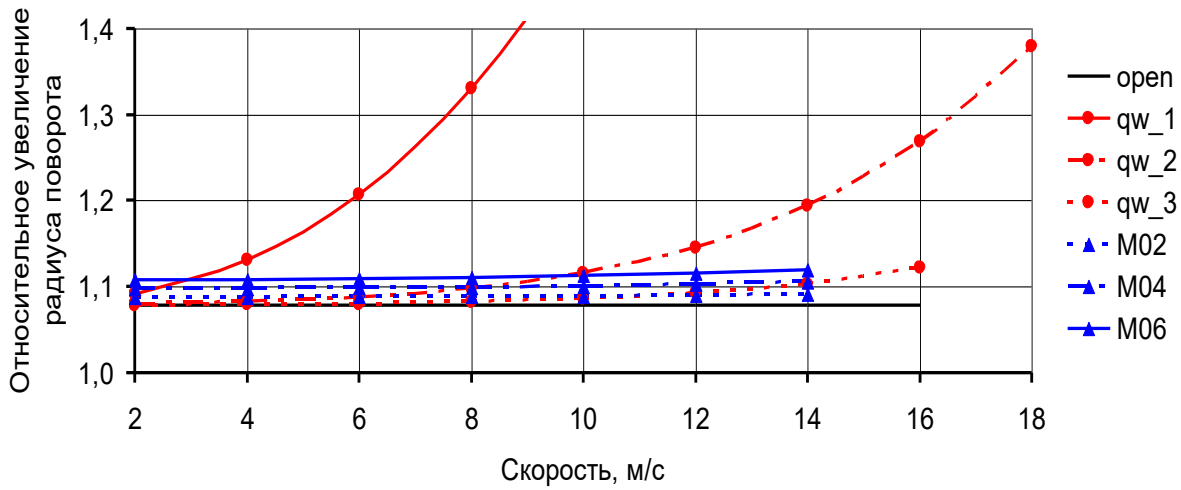


в)

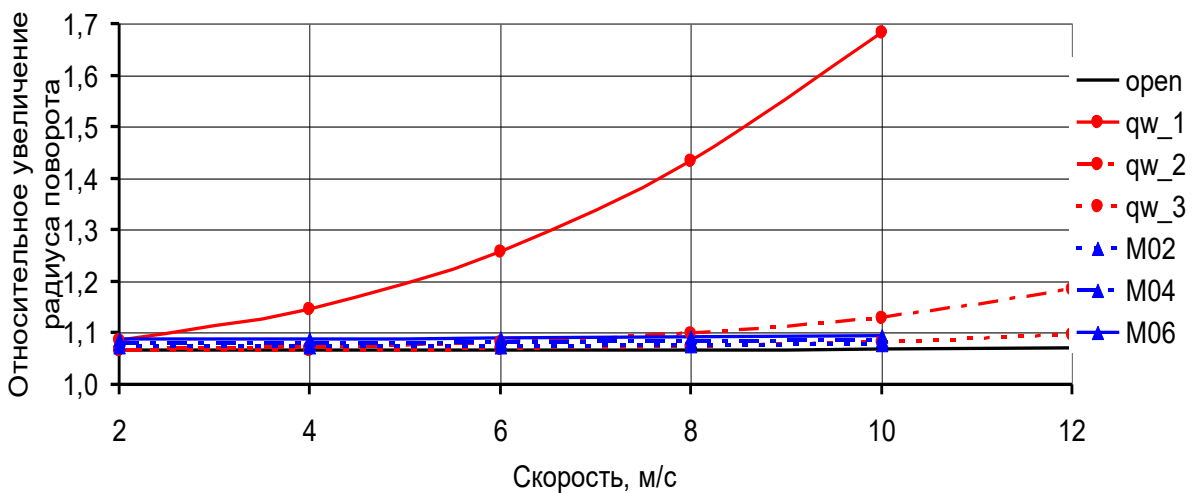
Рис. 3. Зависимость относительного увеличения затрат мощности на криволинейное движение бронетранспортера, оборудованного различными межколесными дифференциалами от скорости движения для различных значений среднего угла поворота управляемых колес первого моста: а – 5°; б – 15°; в – 25°



а)



б)



в)

Рис. 4. Зависимость относительного увеличения действительного радиуса поворота бронетранспортера, оборудованного различными межколесными дифференциалами, от скорости движения для различных значений среднего угла поворота управляемых колес первого моста: а – 5° ; б – 15° ; в – 25°

Выводы

Проведенные расчеты показали, что:

1) межколесные дифференциалы с моментом блокировки, зависящим от нагрузки (в том числе и штатный двухрядный кулачковый дифференциал) достаточно успешно конкурируют с рассматриваемыми дифференциалами с гидростатической блокировкой по эффективности работы в сложных дорожных условиях, но без полного вывешивания одного из колес;

2) для межколесных дифференциалов с гидростатической блокировкой достаточно иметь диаметр дросселирующего отверстия более 3 мм для беспрепятственного входа бронетранспортера в поворот и криволинейного движения без существенного увеличения энергозатрат и ухудшения управляемости;

3) с целью получения необходимой проходимости и динамики движения в сложных дорожных условиях для межколесных дифференциалов с гидростатической блокировкой необходимо иметь диаметр дросселирующего отверстия не более 1 мм;

4) для ликвидации полученного противоречия предлагается ставить в шестеренчатый насос управляемый электромагнитный клапан, который в тяжелых дорожных условиях будет позволять по команде водителя в любом режиме движения уменьшать проходное сечение до диаметра менее 1 мм или вообще полностью его закрывать с расчетом на предохранительный клапан по давлению и естественные утечки.

Литература: 1. Волонцевич, Д.О. К вопросу определения зоны нечувствительности самоблокирующихся межколесных дифференциалов с коэффициентом блокировки, зависящим от скорости относительного вращения колес / Д.О. Волонцевич, Я.М. Мормило // *Механіка та машинобудування*, – №1, – 2016. – С. 30–35. 2. Проектирование полноприводных колесных машин: Учебник для вузов: в 3 т., Т.2 / Б.А. Афанасьев, Л.Ф. Жеглов, В.Н. Зузов и др.; Под ред. А.А. Полуняна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 528 с.: ил. 3. Павлов В.В. Проектно-расчетные расчеты транспортных средств специального назначения (ТССН): учеб. пособие / В.В. Павлов. – М.: МАДИ, 2014. – 116 с. 4. Differential (mechanical device) from Wikipedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_%28_mechanical_device%29; 28 January, 2018. 5. Locking differential from Wikipedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Locking_differential; 22 July, 2017. 6. Limited-slip differential from Wikipedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Limited-slip_differential; 10 February, 2018. 7. Mihailidis A., Nerantzis I. Recent Developments in Automotive Differential Design. In book: *Power Transmissions. Proceedings of the 4th International Conference, held at Sinaia, Romania, June 20–23, 2012.* – Volume 13 of the series *Mechanisms and Machine Science.* –P.P. 125–140. DOI 10.1007/978-94-007-6558-0_8. 8. Волонцевич Д.О. К вопросу определения нагрузочных режимов блокируемых и самоблокирующихся межколесных дифференциалов военных колесных машин / Д.О. Волонцевич, Я.М. Мормило // *Вісник НТУ «ХПИ»*. Серія: *Транспортне машинобудування*. – Х.: НТУ «ХПИ», 2017. – № 14 (1236). – С. 175-179. 9. Mormylo Ia. Study of the Possibility of Using Gear Pumps without Additional Friction Discs for Hydrostatic Locking of Automobile Differentials / Ia. Mormylo // *Mechanics, Materials Science and Engineering*, September 2018 – ISSN 2412-5954, – Vol. 17 – *Mechanical Engineering and Physics*, – 8 p. DOI 10.2412/mmse. 73.48.557. 10. Volontsevych D., Veretennikov Ie., Mormylo Ia., Karpov V. Evaluation of the efficiency of the vehicle with various inter-wheeled differentials for different clutch conditions on sides in acceleration regime // *Materials of XXVII International Scientific Conference «Trans and Motauto'2019»*, 17–

20.06.2019, Varna, Bulgaria. **11.** D. Volontsevich, Ja. Mormylo, Ie. Veretennikov Analysis of the influence of the cross-wheel differentials design on the resistance of the car curved motion // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Applied Mechanics*. The article is in the editorial office of the journal. **12.** Mattijs Klomp. Degree Project 2005: M025: Passenger Car All-Wheel Drive Systems Analysis. University of Trollhättan / Uddevalla, Department of Technology, Mathematics and Computer Science. – 41 p. Retrieved from [http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A215317 &dsid=1997](http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A215317&dsid=1997); 10 February, 2018. **13.** Annicchiaricom C., Rinchi M., Pellari S. and Capitani R. Design of a Semi Active Differential to Improve the Vehicle Dynamics, ASME 45837, vol.1, 2014. **14.** Keller A., Aliukov S. and Anchukov V. Studies of Stability and Control of Movement of Multipurpose Vehicle. Proceedings of the World Congress on Engineering 2017 Vol II WCE 2017, July 5-7, 2017, London, U.K. **15.** Driveline Systems of Ground Vehicles: Theory and Design / A.F. Andreev, V. Kabanau, V. Vantsevich. 2010. CRC Press (Series: Ground Vehicle Engineering). – 518 p. **16.** Pozin B.M., Troyanovskaya I.P., Yusupov A.A. Optimal power distribution between the wheels of a mobile vehicle under different soil conditions. International Conference on Industrial Engineering. Procedia Engineering 129 (2015) 713–717. **17.** Keller A., Murog I. and Aliukov S, Comparative Analysis of Methods of Power Distribution in Mechanical Transmissions and Evaluation of their Effectiveness, SAE Technical Paper 2015-01-1097, 2015, <https://doi.org/10.4271/2015-01-1097>. **18.** Keller A.V., Posin B.M., Troyanovskaya I.P., Bondar V.N., Yusupov A.A. For the Task of Distributing Power Between the Mobile Vehicle Wheels. Tractors and Agricultural Vehicles (RF). – 2015. – No. 3. – P. 10-12.

Bibliography (transliterated): **1.** Volontsevych, D.O., Mormylo Ia.M. (2016) [K voprosu opredeleniya zonyi nechuvstvitelnosti samoblokiruyuschihsia mezhkolesnyih differentsialov s koeffitsientom blokirovki, zavisyaschim ot skorosti otnositelnogo vrascheniya koles] On the determination of insensitivity zone self-locking cross-axle differential with lock ratio, speed-dependent relative rotation of wheels (in Russian). *Mehanika ta mashinobuduvannya (Ukraine)*; 1, 30-35. **2.** Afanasev B.A., Zheglov L.F., Zuzov V.N. and others, Polungyan A.A. – editor. (2008). [Proektirovanie polnoprivodnyih kolesnyih mashin: Uchebnik dlya vuzov: v 3 t., T.2] Design of all-wheel drive wheeled vehicles: Textbook for high schools (in Russian) in 3 volumes, V.2. Moscow: Publishing house of the MSTU named after N.E. Bauman, 528. **3.** Pavlov V.V. (2014). [Proektirovochnyye rascheti transportnyih sredstv spetsialnogo naznacheniya] Calculations for designing of the special vehicles: Textbook (in Russian). Moscow: Publishing house of the Moscow Automobile and Road Institute, 116. **4.** Differential (mechanical device) from Wikipedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_%28mechanical_device%29; 28 January, 2018. **5.** Locking differential from Wikipedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Locking_differential; 22 July, 2017. **6.** Limited-slip differential from Wikipedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Limited-slip_differential; 10 February, 2018. **7.** Mihailidis A, Nerantzis I. (2012). Recent Developments in Automotive Differential Design. In book: Power Transmissions. Proceedings of the 4th International Conference, held at Sinaia, Romania, June 20–23, 2012. – Volume 13 of the series Mechanisms and Machine Science. 125–140. DOI 10.1007/978-94-007-6558-0_8. **8.** Volontsevych D.O., Mormylo Ia.M. (2017) [K voprosu opredeleniya nagruzochnyih rezhimov blokiruemyih i samoblokiruyuschihsia mezhkolesnyih differentsialov voennyih kolesnyih mashin] To the question of determining the load mode of blockable and self-blockable cross-axle differentials of military wheeled vehicles (in Russian). *Visnyk NTU "KhPI", Zbirnyk naukovykh prats'*. Seriya: Transportne mashynobuduvannya. – Kharkiv: NTU «KhPI» (Ukraine) 14 (1236), 175-179. **9.** Mormylo Ia. (2018) Study of the Possibility of Using Gear Pumps without Additional Friction Discs for Hydrostatic Locking of Automobile Differentials. *Mechanics, Materials Science and Engineering*, – ISSN 2412-5954, –Vol. 17 – Mechanical Engineering and Physics. DOI 10.2412/mmse.73.48.557. **10.** Volontsevych D., Veretennikov Ie., Mormylo Ia., Karpov V. Evaluation

of the efficiency of the vehicle with various inter-wheeled differentials for different clutch conditions on sides in acceleration regime // Materials of XXVII International Scientific Conference «Trans and Motauto'2019», 17–20.06.2019, Varna, Bulgaria. 11. D. Volontsevich, Ya. Mormylo, Ie. Veretennikov Analysis of the influence of the cross-wheel differentials design on the resistance of the car curved motion // Eastern–European Journal of Enterprise Technologies, Applied Mechanics. The article is in the editorial office of the journal. 12. Mattijs Klomp. Degree Project 2005: M025: Passenger Car All-Wheel Drive Systems Analysis. University of Trollhättan / Uddevalla, Department of Technology, Mathematics and Computer Science. – 41 p. Retrieved from <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A215317&dswid=1997>; 10 February, 2018. 13. Annicchiaricom, C., Rinchi, M., Pellari, S. and Capitani, R. (2014) Design of a Semi Active Differential to Improve the Vehicle Dynamics, ASME 45837, vol.1. 14. Keller A., Aliukov S. and Anchukov V. (2017) Studies of Stability and Control of Movement of Multipurpose Vehicle. Proceedings of the World Congress on Engineering 2017 Vol II WCE 2017, July 5-7, London, U.K. 15. Andreev A.F., Kabanau V., Vantsevich V. (2010) Driveline Systems of Ground Vehicles: Theory and Design. CRC Press (Series: Ground Vehicle Engineering), 518. 16. Pozin B.M., Troyanovskaya, I.P., Yusupov, A.A. (2015) Optimal power distribution between the wheels of a mobile vehicle under different soil conditions. International Conference on Industrial Engineering. Procedia Engineering 129 (2015) 713–717. 17. Keller A., Murog I. and Aliukov S., (2015) Comparative Analysis of Methods of Power Distribution in Mechanical Transmissions and Evaluation of their Effectiveness, SAE Technical Paper 2015-01-1097, 2015, <https://doi.org/10.4271/2015-01-1097>. 18. Keller A.V., Posin B.M., Troyanovskaya I.P., Bondar V.N., Yusupov A.A. (2015) For the Task of Distributing Power Between the Mobile Vehicle Wheels. Tractors and Agricultural Vehicles (RF). 3, 10-12.

Волонцевич Д.О., Мормило Я.М.

ДО ПИТАННЯ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ МІЖКОЛІСНОГО ДИФЕРЕНЦІАЛУ ІЗ ВНУТРІШНЬОЮ АВТОМАТИЧНІСТЮ НА ОСНОВІ ГІДРОСТАТИЧНОГО БЛОКУВАННЯ

В роботі на прикладі колісного бронетранспортера БТР-4 визначено рекомендовані параметри діаметра дроселюючого отвору в шестеренному насосі міжколісного диференціалу з гідростатичним блокуванням. Запропоновано варіант за рахунок введення керованого електромагнітного клапана отримати оптимальні характеристики міжколісного диференціалу як для важких дорожніх умов, так і для руху по дорогах із твердим покриттям.

D. Volontsevich, Ya. Mormylo

TO THE QUESTION OF STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF INTER-WHEEL DIFFERENTIAL WITH INTERNAL AUTOMATION BASED ON HYDROSTATIC BLOCKING

Using the example of the BTR-4 wheeled armored personnel carrier, the recommended parameters for the diameter of the throttling orifice in a gear pump of a inter-wheel differential with hydrostatic blocking are determined. A variant has been proposed by introducing a controlled electromagnetic valve to obtain optimum characteristics for inter-wheel differential in both heavy road conditions and for driving on paved roads.