



МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 629.3

А.Н. КОЛЕСНИКОВИЧ

начальник отдела моделирования и виртуальных испытаний РКЦМП¹

E-mail: kan@tut.by

А.Г. ВЫГОННЫЙ, канд. техн. наук, доц.

ведущий научный сотрудник¹

E-mail: vigonny@mail.ru

А.А. ГОНЧАРКО

научный сотрудник¹

E-mail: goncharko.alex@gmail.com

Д.Г. ЛОПУХ

заведующий сектором виртуальных испытаний¹

E-mail: lopuchd@yandex.ru

Александр Л. КРАВЧЕНОК

младший научный сотрудник¹

Алексей Л. КРАВЧЕНОК

младший научный сотрудник¹

М.В. РАК

заместитель главного конструктора²

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²ОАО «БЕЛАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», г. Жодино, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 21.10.2019.

ОЦЕНКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПРИВОДА СДВОЕННЫХ КОЛЕС КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА ПРИ ПОВОРОТЕ

Работа посвящена исследованию мощностных и силовых параметров привода колес карьерного самосвала со сдвоенными колесами на основе компьютерного моделирования. Дана сравнительная оценка мощности и силовой нагруженности электропривода колес при наличии и отсутствии межколесного дифференциала в сдвоенных колесах. Показана целесообразность использования межколесного дифференциала в сдвоенных колесах, позволяющего снизить необходимую мощность и силовую нагруженность, а также уменьшить проскальзывание шин. Компьютерное моделирование выполнено в программе ADAMS [1].

Ключевые слова: карьерный самосвал, динамическая модель, межколесный дифференциал, сдвоенное колесо, проскальзывание шин, компьютерное моделирование, ADAMS

Основным видом технологического транспорта при добыче полезных ископаемых открытым способом является автомобильный, которым перевозится от 80 до 100 % всей горной массы, добываемой в мире. Тенденции совершенствования

карьерных самосвалов идут по пути увеличения их грузоподъемности [2, 3].

В настоящее время обеспечение карьерным самосвалом с колесной формулой 4×4 грузоподъемностью 450 т возможно при использовании шин

размерности 59/80R63 [4]. При этом применяются сдвоенные колеса, включающие две шины на каждом колесе. Анализ работы сдвоенных колес мобильных машин особо большой грузоподъемности рассматривался в работах [5, 6]. Проведенный патентный поиск по конструкциям механизмов привода шин показал, что в качестве механизма привода шин в колесе может использоваться дифференциал [7].

В настоящей работе рассматривается эффективность применения межколесного дифференциала в сдвоенных колесах с оценкой мощностных и силовых параметров привода колес карьерного самосвала грузоподъемностью 450 т [8].

Опорно-поворотные механизмы обеспечивают поворот переднего и заднего ведущих мостов при маневрировании во время движения. При одновременном повороте обоих мостов на 15° обеспечивается минимальный радиус поворота — 19,8 м (рисунок 1 а). При больших радиусах поворота (более 38 м) можно использовать для поворота только один передний мост (см. рисунок 1 б). При повороте переднего моста на 15° маневренности самосвала достаточно для движения в карьере или из карьера, кроме маневрирования при подъезде на загрузку или разгрузку при радиусе поворота менее 38 м.

Сдвоенное колесо в отличие от одинарного колеса при круговом движении вызывает дополнительное сопротивление движению. Это связано с тем, что наружная и внутренняя шина левого или правого бортов карьерного самосвала движутся с разными линейными скоростями при прохождении различного пути, зависящего от радиуса поворота и нагрузки на шину. В результате в пятне контакта появляются дополнительные касательные силы, которые создают момент, препятствующий повороту колеса, и происходит нежелательная циркуляция мощности. Таким образом, актуальной задачей является исследование работы шин в сдвоенных колесах.

В данной работе исследовались различные способы поворота с помощью виртуального моделирования. Так как показатели при повороте зависят от характеристик шин, был выбран пакет виртуального моделирования ADAMS, в котором имеется достаточно полный набор средств для исследования кинематики и динамики машин, в том числе с учетом детальных параметров шин. При этом была использована модель шины, разработанная на основе теории Х.Б. Пачейка [9].

Технические характеристики рассматриваемого самосвала приведены в таблице 1.

Разработанная динамическая модель самосвала включает:

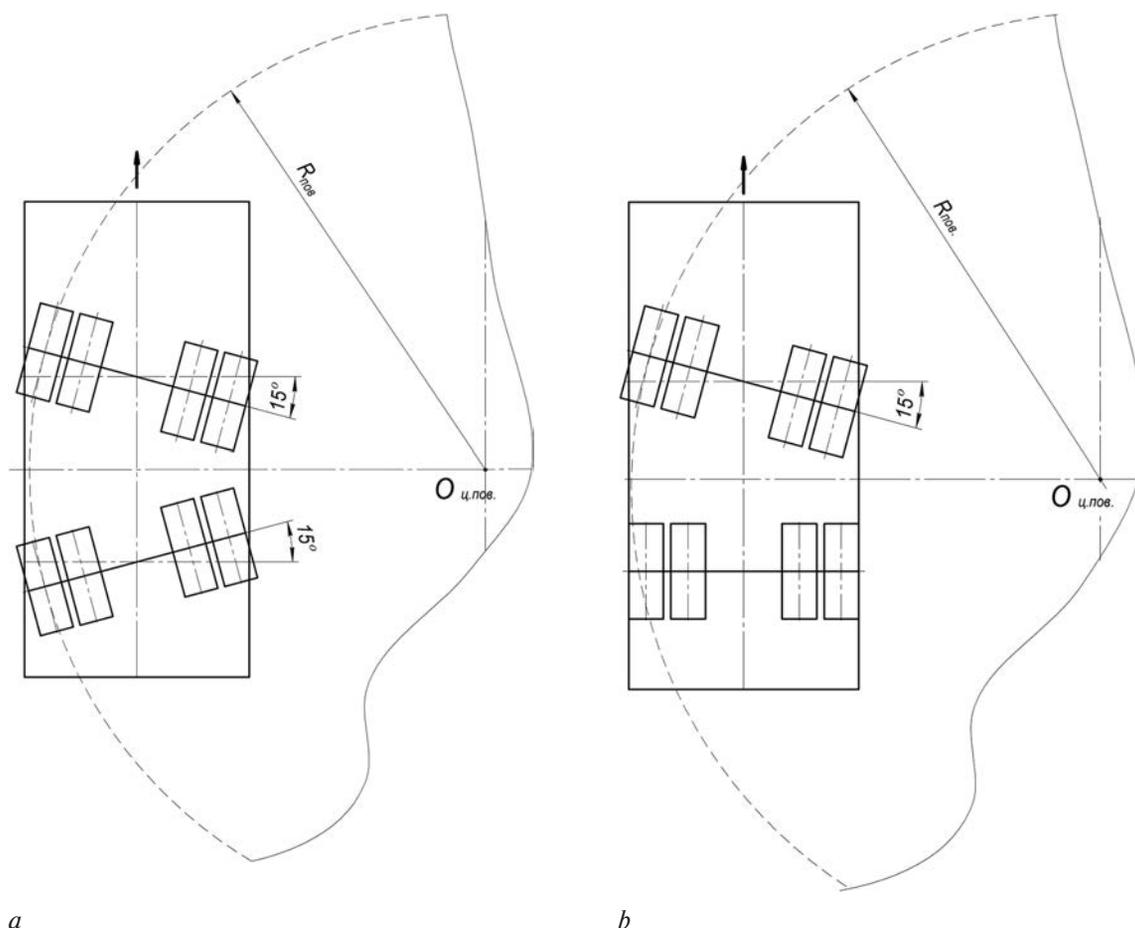


Рисунок 1 — Кинематические схемы поворота: а — поворот двух мостов на 15° ; б — поворот переднего моста на 15°
Figure 1 — Kinematic schemes of turning: а — turning of both axles by 15° ; б — turning of the front axle by 15°

Таблица 1 — Технические характеристики карьерного самосвала
Table 1 — Technical characteristics of a mining dump truck

Показатели	Значения
Полная масса груженого самосвала, т	810
Радиус поворота по оси следа переднего внешнего (относительно центра поворота) колеса, м, не более	19,8
Развиваемая мощность ТЭД в режиме тяги, кВт	700
Крутящий момент на валу ТЭД, кН·м	30*
Передаточное число редуктора мотор-колеса	29,2

Примечание: *при приведении к колесу крутящий момент на ступице ≈ 876 кН·м

- массо-габаритные и инерционные параметры основных узлов самосвала;
- подвеску самосвала;
- систему управления поворотом мостов;
- модели шин;
- электрические дифференциалы (заменены механическими).

Для модели шин в пакете ADAMS были приняты параметры, приведенные в таблице 2.

Зависимость продольной силы на рассматриваемой шине от коэффициента продольного скольжения приведена на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, максимальная продольная сила на рассматриваемой шине составляет 650 000 Н при коэффициенте продольного скольжения 12 %.

Общий вид модели самосвала с моделью дороги в ADAMS представлен на рисунке 3.

Таблица 2 — Краткая характеристика шин 59/80 R63 в ADAMS
Table 2 — Brief description of the tires 59/80 R63 in ADAMS program

Показатели	Значения
Свободный радиус (UNLOADED_RADIUS), м	2,0125
Ширина в свободном состоянии (WIDTH), м	1,470
Отношение ширины к высоте (ASPECT_RATIO)	0,8
Радиус обода (RIM_RADIUS), м	1,11
Ширина обода (RIM_WIDTH), м	1,71
Коэффициент вертикальной жесткости (VERTICAL_STIFFNESS), Н/м	4532700
Коэффициент демпфирования (VERTICAL_DAMPING), Н·м/с	50000
Номинальная нагрузка (F_{NOMIN}), Н	1000000
Минимальная нагрузка (F_{ZMIN}), Н	17500
Максимальная нагрузка (F_{ZMAX}), Н	1300000
Коэффициент сцепления шин с опорной поверхностью (P_{DYI})	0,65
Коэффициент сопротивления качению (Q_{SYI})	0,02

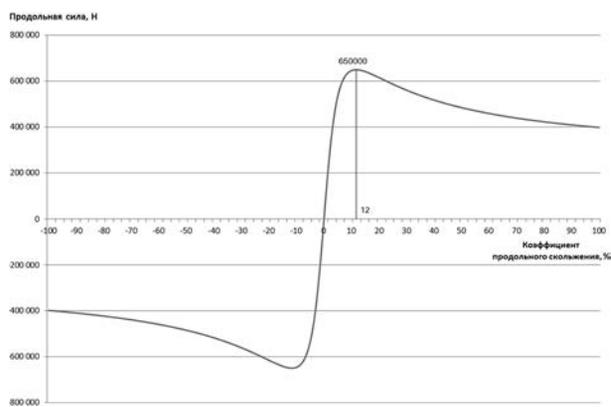


Рисунок 2 — График зависимости продольной силы от коэффициента продольного скольжения
Figure 2 — Graph of the dependence of the longitudinal force on the longitudinal sliding coefficient

Для анализа затрачиваемой мощности на поворот производилось измерение крутящих моментов на ступице колеса и частот вращения всех колес самосвала при повороте. Коэффициент сцепления шин с опорной поверхностью принимался равным 0,65. Рассматривался установившийся поворот направо с постоянной скоростью.

Результаты расчета показателей, характеризующих движение по криволинейной траектории постоянного радиуса самосвала без межшинных дифференциалов в сдвоенных колесах при повороте обоих мостов на 15° (см. рисунок 1 а), приведены в таблице 3. При этом скорость самосвала в центре масс равна 1,34 м/с, минимальный радиус поворота по оси следа переднего внешнего (относительно центра поворота) колеса — 20,9 м.

Анализ результатов в таблице 3 показывает, что на переднем левом наружном колесе крутящий момент на наружной шине имеет положительное значение и составляет 935,2 кН·м, а на внутренней шине имеет отрицательное значение и составляет 752,4 кН·м. Максимальная мощность на колесе составляет 162,7 кВт, а крутящий момент на ступице — 182,8 кН·м. Коэффициент продольного скольжения шин — 8,2 %. Сравнение приведенного коэффициента продольного скольжения с графиком на рисунке 2 показывает, что имеется запас

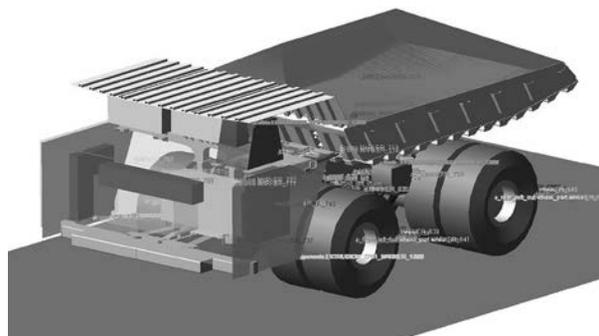


Рисунок 3 — Общий вид динамической модели самосвала с моделью дороги
Figure 3 — General view of a dynamic dump truck model with a road model

Таблица 3 — Результаты расчета параметров поворота самосвала без межшинных дифференциалов в сдвоенных колесах при повороте обоих мостов на 15° (см. рисунок 1 а), $V = 1,34$ м/с, $R = 20,9$ м
 Table 3 — Results of calculation of parameters for turning the dump truck without inter-tire differentials in the twin wheels when turning both axles by 15° (see Figure 1 а), $V = 1.34$ m/s, $R = 20.9$ m

Измеряемый параметр	Положение колеса											
	переднее левое			переднее правое			заднее левое			заднее правое		
	наружная шина	внутренняя шина	на колесе	наружная шина	внутренняя шина	на колесе	наружная шина	внутренняя шина	на колесе	наружная шина	внутренняя шина	на колесе
Коэффициент продольного скольжения, %	-3,82	5,14	—	-5,1	8,21	—	-3,81	5,13	—	-5,06	8,22	—
Крутящий момент на ступице колеса, кН·м	-752,4	935,2	182,8	-821,9	1004,8	182,8	-746,5	929,3	182,8	-849,4	1032,3	182,8
Скорость вращения колеса, рад/с	0,89	0,89	0,89	0,60	0,60	0,60	0,89	0,89	0,89	0,60	0,60	0,60
Мощность, кВт	-669,6	832,3	162,7	-493,1	602,9	109,7	-664,4	827,1	162,7	-509,6	619,4	109,7

по возможной максимальной продольной силе: полученный коэффициент продольного скольжения не превышает 8,2 %, а возможное значение для максимальной продольной силы составляет 12 %.

Результаты расчета параметров поворота самосвала без межколесных дифференциалов в сдвоенных колесах, когда передний мост повернут на 15° (см. рисунок 1 б), представлены в таблице 4. Скорость самосвала 1,38 м/с при радиусе поворота 38,6 м. При этом максимальный крутящий момент на колесе составляет 115,2 кН·м. А мощность на колесе лежит в пределах от 77,2 до 95,6 кВт. Коэффициент продольного скольжения не превышает 3,2 %.

Для оценки влияния циркуляции мощности между шинами на затраты мощности, необходи-

мой для поворота, в динамической модели самосвала были смоделированы межколесные дифференциалы во все четыре сдвоенных колеса. Схема, показывающая принцип работы межколесного дифференциала в сдвоенных колесах, представлена на рисунке 4.

Результаты расчета параметров поворота самосвала (на 15° повернуты оба моста) с межколесными дифференциалами в сдвоенных колесах представлены в таблице 5. При скорости самосвала 1,35 м/с радиус поворота снизился с 20,9 до 19,6 м. Как видно из таблицы 4, применение межколесного дифференциала в сдвоенных колесах дает уменьшение сопротивления повороту: крутящий момент на ступице снижается в 2,3 раза и составляет 80,1 кН·м, при этом мощность

Таблица 4 — Результаты расчета параметров поворота самосвала без межшинных дифференциалов в сдвоенных колесах при повороте переднего моста на 15° (см. рисунок 1 б), $V = 1,38$ м/с, $R = 38,6$ м
 Table 4 — Results of calculation of parameters for turning the dump truck without inter-tire differentials in the twin wheels when turning the front axle by 15° (see Figure 1 б), $V = 1.38$ m/s, $R = 38.6$ m

Измеряемый параметр	Положение колеса											
	переднее левое			переднее правое			заднее левое			заднее правое		
	наружная шина	внутренняя шина	на колесе	наружная шина	внутренняя шина	на колесе	наружная шина	внутренняя шина	на колесе	наружная шина	внутренняя шина	на колесе
Коэффициент продольного скольжения, %	-2,17	2,56	—	-2,64	3,06	—	-2,25	2,61	—	-2,75	3,16	—
Крутящий момент на ступице колеса, кН·м	-503,3	618,6	115,2	-570,8	685,7	115,2	-511,1	626,4	115,2	-589,5	713,7	115,2
Скорость вращения колеса, рад/с	0,83	0,83	0,83	0,69	0,69	0,69	0,81	0,81	0,81	0,67	0,67	0,67
Мощность, кВт	-417,7	513,4	95,6	-393,9	473,1	79,5	-414,0	507,4	93,3	-395,0	478,2	77,2

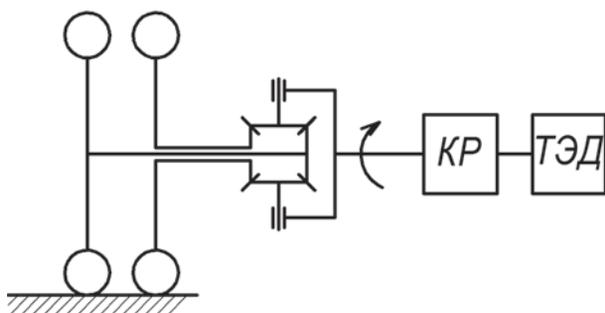


Рисунок 4 — Схема моделируемого межколесного дифференциала в сдвоенном колесе: ТЭД — тяговый электродвигатель; КР — колесный редуктор

Figure 4 — Scheme of the simulated inter-wheel differential in a twin wheel: ТЭД — traction motor; КР — wheel reducer

на колесах наружного борта составляет 72,9 кВт, внутреннего — 47,3 кВт, и снижается в 2,2÷2,3 раза по сравнению с моделью без межколесных дифференциалов в сдвоенных колесах. При этом коэффициент продольного скольжения снижается до 0,1%, а по сравнению с моделью без межколесных дифференциалов в сдвоенных колесах — более чем в 50 раз.

Результаты расчета параметров поворота самосвала (передний мост на 15°, задний на 0°) с межколесными дифференциалами в сдвоенных колесах представлены в таблице 6. Самосвал двигался со скоростью 1,38 м/с и радиус поворота при этом снизился с 36,8 до 35 м. Максимальная мощность на колесах при повороте составила 66,7 кВт, крутящий момент на ступице колеса — 79,4 кН·м, коэффициент продольного скольжения — 0,1 %.

Для удобства сопоставления полученные результаты поворота самосвала при наличии и отсутствии межколесного дифференциала в сдвоенных колесах представлены на рисунке 5.

Гистограмма на рисунке 5 показывает, что применение межколесного дифференциала в сдвоенных колесах снижает мощность, моменты на ступицах, а также радиусы поворота самосвала.

Таблица 5 — Результаты расчета параметров поворота самосвала с межколесными дифференциалами в сдвоенных колесах при повороте обоих мостов на 15° (см. рисунок 1 а), $V = 1,35$ м/с, $R = 19,6$ м
Table 5 — Results of calculation of parameters for turning the dump truck with inter-wheel differentials in the twin wheels when turning both axles by 15° (see Figure 1 a), $V = 1.35$ m/s, $R = 19.6$ m

Измеряемый параметр	Положение колеса											
	переднее левое			переднее правое			заднее левое			заднее правое		
	наружная шина	внутренняя шина	на колесе	наружная шина	внутренняя шина	на колесе	наружная шина	внутренняя шина	на колесе	наружная шина	внутренняя шина	на колесе
Коэффициент продольного скольжения, %	0,093	0,099	—	0,095	0,095	—	0,09	0,092	—	0,087	0,089	—
Крутящий момент на ступице колеса, кН·м	40	40,1	80,1	40,1	40	80,1	40,1	40	80,1	40	40,1	80,1
Скорость вращения колеса, рад/с	0,95	0,86	0,91	0,63	0,55	0,59	0,95	0,86	0,91	0,64	0,55	0,59
Мощность, кВт	38,0	34,5	72,9	25,3	22,0	47,3	38,1	34,4	72,9	25,6	22,1	47,3

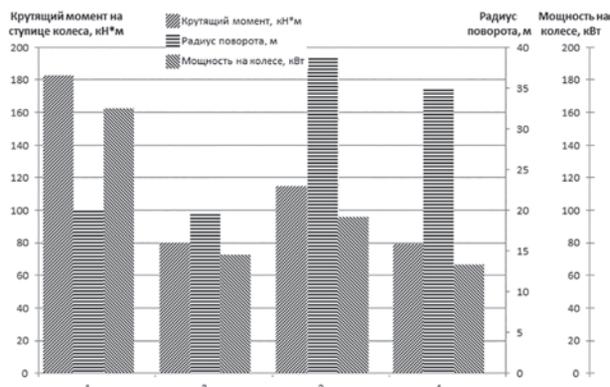


Рисунок 5 — Сравнение радиусов поворота самосвала, максимальных крутящих моментов и мощности на колесах при отсутствии и наличии межколесных дифференциалов в сдвоенных колесах: 1 — поворот переднего и заднего моста на 15°; 2 — поворот переднего моста на 15°; 3 — поворот переднего и заднего моста на 15° с межколесными дифференциалами в сдвоенных колесах; 4 — поворот переднего моста на 15° с межколесными дифференциалами в сдвоенных колесах

Figure 5 — Comparison of dump truck turning radii, maximum torques and power on wheels in the absence and presence of inter-wheel differentials in the twin wheels: 1 — turning of the front and rear axle by 15°; 2 — turning of the front axle by 15°; 3 — turning of the front and rear axle by 15° with inter-wheel differentials in the twin wheels; 4 — turning of the front axle by 15° with inter-wheel differentials in the twin wheels

Влияние межколесного дифференциала в сдвоенных колесах на коэффициент продольного скольжения шин при движении в повороте приведено на рисунке 6.

Приведенные данные на рисунке 6 наглядно показывают, что применение межколесных дифференциалов в сдвоенных колесах снижает в несколько раз коэффициент продольного скольжения шин. Поэтому применение межколесного дифференциала в сдвоенных колесах позволит значительно повысить износостойкость шин.

Выводы. В ходе проведенных исследований разработаны динамические модели самосвала, учитывающие наличие и отсутствие межколесных дифференциалов в сдвоенных колесах.

Таблица 6 — Результаты расчета параметров поворота самосвала с межколесными дифференциалами в сдвоенных колесах при повороте переднего моста на 15° (см. рисунок 1 б), $V = 1,38$ м/с, $R = 35,0$ м
 Table 6 — Results of calculation of parameters for turning the dump truck with inter-wheel differentials in the twin wheels when turning the front axle by 15° (see Figure 1 б), $V = 1.38$ m/s, $R = 35.0$ m

Измеряемый параметр	Положение колеса											
	переднее левое			переднее правое			заднее левое			заднее правое		
	наружная шина	внутренняя шина	на колесе	наружная шина	внутренняя шина	на колесе	наружная шина	внутренняя шина	на колесе	наружная шина	внутренняя шина	на колесе
Коэффициент продольного скольжения, %	0,092	0,092	—	0,097	0,097	—	0,088	0,087	—	0,085	0,086	—
Крутящий момент на ступице колеса, кН·м	39,7	39,7	79,4	39,7	39,7	79,4	39,7	39,7	79,4	39,7	39,7	79,4
Скорость вращения колеса, рад/сек	0,86	0,82	0,84	0,7	0,66	0,68	0,84	0,79	0,82	0,68	0,64	0,66
Мощность, кВт	34,1	32,6	66,7	27,8	26,2	54,0	33,3	31,4	65,1	27,0	25,4	52,4

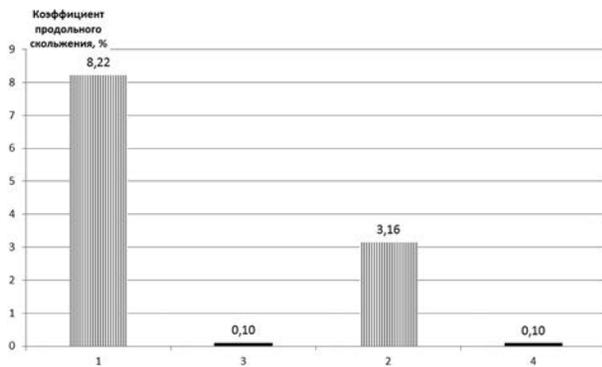


Рисунок 6 — Коэффициенты продольного скольжения при отсутствии и наличии межколесного дифференциала в сдвоенных колесах: 1 — поворот переднего и заднего моста на 15°; 2 — поворот переднего моста на 15°; 3 — поворот переднего и заднего моста на 15° с межколесными дифференциалами в сдвоенных колесах; 4 — поворот переднего моста на 15° с межколесными дифференциалами в сдвоенных колесах

Figure 6 — Longitudinal sliding coefficient in the absence and presence of inter-wheel differentials in the twin wheels: 1 — turning of the front and rear axle by 15°; 2 — turning of the front axle by 15°; 3 — turning of the front and rear axle by 15° with inter-wheel differentials in the twin wheels; 4 — turning of the front axle by 15° with inter-wheel differentials in the twin wheels

Результаты моделирования показали, что применение межколесных дифференциалов в сдвоенных колесах самосвала позволяет:

- уменьшить мощность на колесах, необходимую для поворота (так при повороте обоих мостов на 15° необходимая максимальная мощность на колесах снижается на 44,8 % (со 162,7 до 72,9 кВт), при этом также уменьшается радиус поворота с 20,9 до 19,6 м);
- уменьшить скольжение колес с 8,2 до 0,2 % при повороте обоих мостов на 15° и радиусе поворота 19,6 м, что приведет к повышению износостойкости шины.

С увеличением радиуса поворота самосвала эффективность применения межколесных дифференциалов в сдвоенных колесах снижается. При увеличении радиуса поворота с 19,6 до 35 м уменьшается мощность на колесах с межколесными дифференциалами в сдвоенных колесах с 55 до 30 %.

Список литературы

1. Мелентьев, В.С. ADAMS/View, ADAMS/PostProcessor: краткий справочник пользователя / В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев. — Самара: Изд-во СГАУ, 2006. — 106 с.
2. Современное развитие карьерного транспорта производства ОАО «БЕЛАЗ» / А.М. Насковец [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2018. — Вып. 7. — С. 8–11.
3. Карьерный автотранспорт: состояние и перспективы / П.Л. Мариев [и др.]. — СПб.: Наука, 2004. — 429 с.
4. «Белшина» изготовила первую шину диаметром 63 дюйма [Электронный ресурс] // Colesa.ru. — Режим доступа: <http://colesa.ru/news/55380>. — Дата доступа: 23.08.2019.
5. Совершенствование привода сдвоенных колес карьерного автотранспорта / А.И. Бобровник [и др.] // Современные проблемы проектирования автомобилей: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию кафедры «Автомобили», Минск, 29–30 окт. 2015 г. / БНТУ; под ред. Ю.Д. Карпиевич, Б.У. Бусел. — Минск, 2015. — С. 82–89.
6. Анализ динамики качения колеса большегрузного самосвала с двойной ошиновкой в пакете ADAMS / А.Г. Выгонный [и др.] // Автомобиле- и тракторостроение: материалы междунар. науч.-практич. конф., Минск, 24–27 мая 2019 г. / БНТУ; редкол.: Д.В. Капский [и др.]. — Минск, 2019. — С. 69–72.
7. Конечная передача ведущего моста транспортного средства: пат. RU 2051501 / Д.В. Андреев. — Оpubл. 27.12.1995.
8. Карьерные самосвалы серии 7571 [Электронный ресурс] // БЕЛАЗ: официальный сайт. — Режим доступа: <http://belaz.by/products/products-belaz/dumpers/dump-trucks-with-electromechanical-transmission/dumpers-series-7571/>. — Дата доступа: 23.08.2019.
9. Tire modelling and simulation thesis [Electronic resource]. — Mode of access: <https://ru.scribd.com/document/99085614/tire-modelling-and-simulation-thesis>. — Date of access: 24.07.2018.

KALESNIKOVICH Andrei N.

Head of the Department of Computer Modelling and Virtual Testing of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering¹

E-mail: kan@tut.by

VYGONNY Albert G., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Leading Researcher¹

E-mail: vignonny@mail.ru

HANCHARKA Aliaksei A.

Researcher¹

E-mail: goncharko.alex@gmail.com

LOPUKH Dzmitry G.

Head of the Department of Virtual Testing¹

E-mail: Lopuchd@yandex.ru

KRAUCHONAK Aliaksandr L.

Junior Researcher¹

KRAUCHONAK Aliaksei L.

Junior Researcher¹

RAK Mikhail V.

Deputy Chief Designer²

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²OJSC “BELAZ” – Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING”, Zhodino, Republic of Belarus

Received 21 October 2019.

EVALUATION OF THE DIFFERENTIAL DRIVE OF THE TWIN WHEELS OF A MINING DUMP TRUCK WHEN TURNING

The focus of this paper is on the study of loading parameters of the mining dump truck drive wheels with twin wheels based on the computer simulation. A comparative assessment of the loading of the wheels' electric drive is given for the design with and without cross-axle differential on the twin wheels. The expediency of using the cross-axle differential on the twin wheels, which reduces the required power and loadings, as well as slip, is shown. Computer simulation is performed using the ADAMS program.

Keywords: mining dump truck, dynamic model, cross-axle differential, twin wheel, tire slippage, computer simulation, ADAMS

References

- Melentev V.S., Gvozdev A.S. *ADAMS/View, ADAMS/Post-Processor: kratkiy spravochnik polzovatelya* [ADAMS/View, ADAMS/PostProcessor: quick reference of the user]. Samara, Samarskiy gosudarstvennyy aerokosmicheskiy universitet Publ., 2006. 106 p.
- Naskovets A.M., Parkhomchik P.A., Egorov A.N., Shishko S.A., Moiseenko V.I. *Sovremennoe razvitiye karernogo transporta proizvodstva OAO “BELAZ”* [Modern development of quarry transport of OJSC “BELAZ” production]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya* [Topical issues of mechanical engineering], 2018, iss. 7, pp. 8–11.
- Mariev P.L., Kuleshov A.A., Egorov A.N., Zyrenov I.V. *Karernyy avtotransport: sostoyaniye i perspektivy* [Quarry transport: current situation and future development]. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2004. 429 p.
- Zolotukhina T. *“Belshina” izgotovila pervuyu shinu diametrom 63 dyuyma* [“Belshina” has manufactured first 63-inch tire]. 2017. Available at: <http://colesa.ru/news/55380> (accessed 23 August 2019).
- Bobrovnik A.I., Pozdnyakov N.A., Varfolomeeva T.A., Gedroyt G.I. *Sovershenstvovanie privoda sdvoennykh koles karernogo avtotransporta*. [Improving the drive of twin wheels for mining vehicles]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Sovremennye problemy proektirovaniya avtomobiley”, posvyashchennoy 75-letiyu kafedry “Avtomobili”* [Proc. International scientific and technical conference “Modern problems of vehicle design” dedicated to the 75th anniversary of the Department “Vehicles”]. Minsk, 2015, pp. 82–89.
- Vygonyy A.G., Lopukh D.G., Kravchenok Alexander L., Kravchenok Aleksey L. *Analiz dinamiki kacheniya koleasa bolshegruznogo samosvala s dvoynoy oshinovkoy v pakete ADAMS* [Analysis of the rolling dynamics of the wheel of a heavy dump truck with double-tire wheel in a package ADAMS]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Avtomobile- i traktorostroeniye”* [Proc. International scientific and technical conference “Automobile and tractor construction”]. Minsk, 2019, pp. 69–72.
- Andreev D.V. *Konechnaya peredacha vedushchego mosta transportnogo sredstva* [Final drive axle of the vehicle]. Patent RF, no. 2051501, 1995.
- Karernyye samosvaly serii 7571* [Mining Dump Truck Series BELAZ-7571]. Available at: <http://belaz.by/products/products-belaz/dumpers/dump-trucks-with-electromechanical-transmission/dumpers-series-7571/> (accessed 23 August 2019).
- Tire modelling and simulation thesis*. Available at: <https://ru.scribd.com/document/99085614/tire-modelling-and-simulation-thesis> (accessed 24 July 2018).