

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.33

Н.С. Вольская, М.М. Жилейкин, А.Ю. Захаров

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЙ МНОГООСНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО НЕРОВНОСТЯМ ДЕФОРМИРУЕМОГО ОПОРНОГО ОСНОВАНИЯ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

Предложены критерии эффективности работы тягового привода колесных машин при прохождении участка местности с неровным деформируемым опорным основанием, позволяющие проводить сравнительную оценку их проходимости. На основе разработанных критериев эффективности представлен сравнительный анализ эффективности работы механической и электромеханической трансмиссий многоосных колесных машин при движении по неровностям деформируемого опорного основания. Эффективность работы тягового привода при прохождении участка местности с неровным деформируемым опорным основанием оценивается по следующим параметрам: среднеквадратическое значение коэффициента скольжения для всех ведущих колес; средняя степень неравномерности буксования ведущих колес; среднеквадратическое значение глубины колеи для левого и правого борта; интегральная мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления движению.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки алгоритмов управления тяговым приводом, позволяющих обеспечить индивидуальное регулирование величин крутящих моментов на ведущих колесах.

Ключевые слова: многоосная колесная машина, тяговый привод, критерии оценки эффективности, деформируемое опорное основание, механические и электромеханические трансмиссии.

Введение

Многообразие и сложность проблем, связанных с повышением проходимости многоосных колесных машин (МКМ) на опорных основаниях с низкой несущей способностью, требует комплексных решений, основанных на различных подходах. Одним из наиболее эффективных решений является применение тягового привода (механический, гидро- и электромеханический, гидрообъемный, комбинированный), позволяющего обеспечить индивидуальное регулирование величин крутящих моментов на ведущих колесах [1]. Актуальность разработки алгоритмов управления таким тяговым приводом очевидна. Известны методы управления, обеспечивающие поддержание заданной угловой скорости вращения ведущих колес [2], перераспределение крутящих моментов в зависимости от вертикальной нагрузки на колесо [3], максимальную энергоэффективность движения [4-5]. Активно ведутся разработки управляемого тягового привода, обеспечивающего повышение управляемости и устойчивости колесных машин, в том числе, на основе методов нечеткой логики [6-12]. Также известны алгоритмы управления тяговым приводом МКМ, направленные на обеспечение высокой проходимости в заданных условиях [2, 5]. Зачастую они оказываются труднореализуемыми, поскольку для обеспечения их работы необходимо знание (измерение или оценка) таких параметров, как радиус качения колеса, степень износа протектора, давление воздуха в шинах, что на практике невозможно. В работах [13, 14] предложены алгоритмы управления индивидуальным тяговым

электроприводом МКМ и автопоездов, обеспечивающие повышение их опорной проходимости за счет минимизации буксования ведущих колес. Однако до сих пор не был проведен сравнительный анализ эффективности предложенных алгоритмов управления тяговым приводом МКМ, в том числе, по причине отсутствия критериев для такого анализа.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ эффективности работы механической и электромеханической трансмиссий МКМ при движении по неровностям деформируемого опорного основания на основе разработанных критериев эффективности.

Условия движения при моделировании прямолинейного движения трехосной колесной машины по деформированному опорному основанию

Математическая модель движения многоосной колесной машины представлена в работе [8], модель качения эластичного колеса по неровностям деформируемого основания – в работе [13]. Для проверки работоспособности и эффективности разработанного в работе [10] алгоритма управления ИТЭП ведущих колес было проведено моделирование движения трехосной колесной машины на деформируемом опорном основании «сухой песок», параметры которого, в соответствии с данными работы [14], приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры грунтового основания «сухой песок»

Параметр грунтового основания	Обозначение	Значение
Коэффициент деформации грунта	$c_{гр}$	0,45 МПа
Показатель плотности грунта	μ	0,15
Удельный вес грунта	γ	0,0145 МН/м ³
Угол внутреннего терния грунта	φ_r^*	37°
Максимальный сдвиг грунта, при котором связанность частиц грунта не нарушена	e_{xm}	0,05 м
Коэффициент трения полного скольжения	$\mu_{s\alpha \max}$	0,6
Константа	S_0	0,05

Машина была оснащена тремя типами тягового привода:

- механический дифференциальный (МЗКТ 6001) (рис. 1);
- механический полностью блокированный (рис. 2);
- индивидуальный электромеханический «мотор-колесо» (рис. 3).

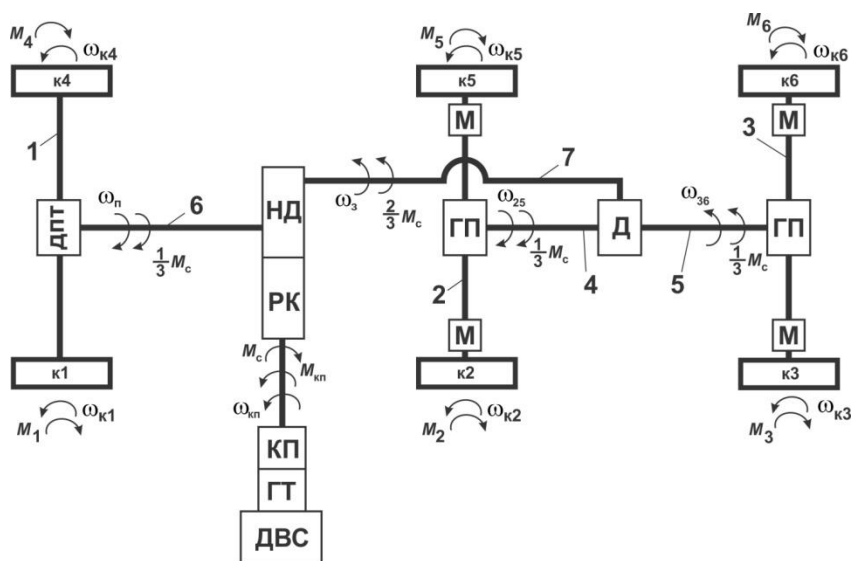


Рис. 1. Схема трансмиссии автомобиля 6х6 МЗКТ 6001:

- 1, 2, 3 – ведущие оси;
- 4...7 – приводные валы; ДВС – двигатель внутреннего сгорания;
- ГТ – гидротрансформатор; ГП – главная передача с заблокированным дифференциалом;
- КП – коробка передач;
- Д – симметричный межосевой дифференциал;
- ДПТ – главная передача с симметричным межколесным дифференциалом повышенного трения;
- РК – раздаточная коробка;
- М – зубчатая муфта свободного хода;
- НД – несимметричный межосевой дифференциал;
- к1... к6 – номера колес;
- M_1, \dots, M_6 – моменты сопротивления качению на колесах;
- $\omega_{к1}, \dots, \omega_{к6}$ – угловые скорости вращения колес;
- $M_{кп}$ – крутящий момент на выходном валу коробки передач;
- $\omega_{кп}$ – угловая скорость вращения выходного вала коробки передач;
- M_c – крутящий момент;
- ω_{25}, ω_{36} – угловые скорости вращения валов 4 и 5 соответственно;
- $\omega_{п}, \omega_{з}$ – угловые скорости вращения валов 6 и 7 соответственно

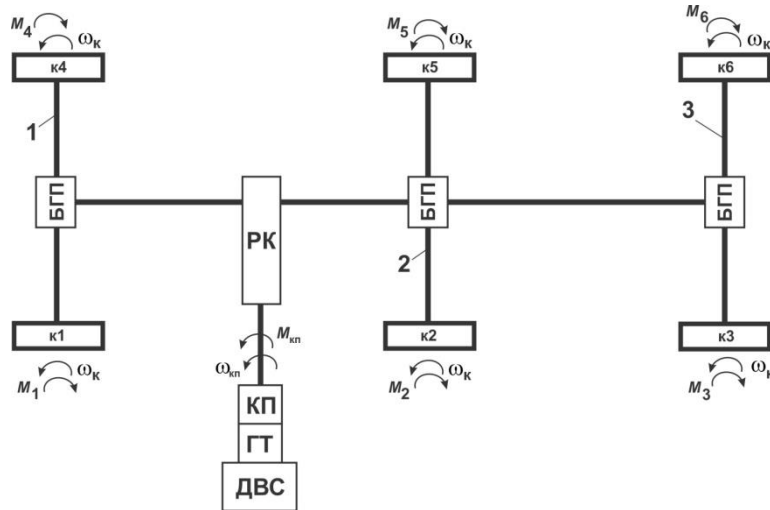


Рис. 2. Схема трансмиссии автомобиля бхб с блокированной механической трансмиссией:

1, 2, 3 – ведущие оси;

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

ГТ – гидротрансформатор;

БГП – главная передача с заблокированным дифференциалом;

КП – коробка передач;

РК – раздаточная коробка; $k1 \dots k6$ – номера колес;

M_1, \dots, M_6 – моменты сопротивления качению на колесах;

ω_k – угловая скорость вращения колес;

$M_{кп}$ – крутящий момент на выходном валу коробки передач;

$\omega_{кп}$ – угловая скорость вращения выходного вала коробки передач

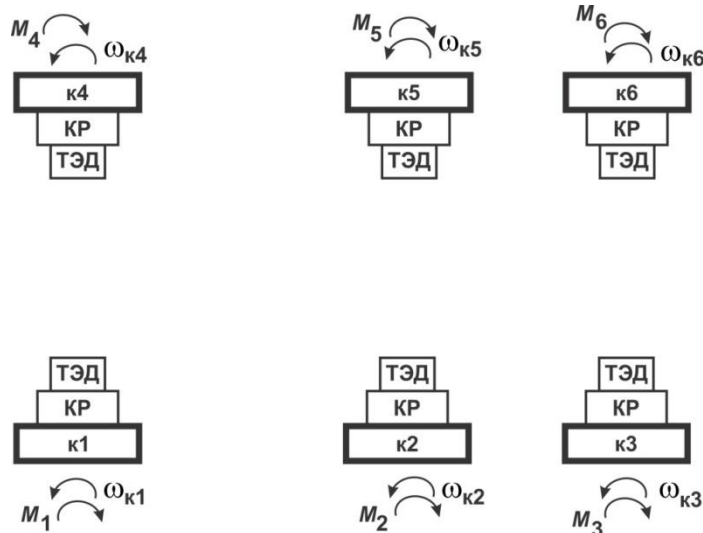


Рис. 3. Схема индивидуального тягового электропривода ведущих колес:

КР – колесный редуктор; ТЭД – тяговый электродвигатель;

$k1 \dots k6$ – номера колес; $M_1, \dots,$

M_6 – моменты сопротивления качению на колесах;

$\omega_{k1}, \dots, \omega_{k6}$ – угловые скорости вращения колес

Краткие технические характеристики механической трансмиссии МЗКТ-6001, принятые при моделировании, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Краткие технические характеристики механической трансмиссии МЗКТ 6001

Параметр	Значение
Полная масса, кг	24 000
Общее передаточное число ведущего моста	7,084
Передаточные числа коробки передач	
1 передача	4,15
2 передача	2,16
3 передача	1,52
4 передача	1,00
5 передача	0,73
Максимальный коэффициент трансформации гидротрансформатора	1,76
Передаточные числа раздаточной коробки понижающей	1,601
высшей	1,00
Мощность двигателя, кВт	309
Максимальный крутящий момент, Нм, при частоте вращения коленвала 1200 об/мин	1 850

Краткие технические характеристики электромеханической трансмиссии трехосной КМ, принятые при моделировании, приведены в табл. 3. Алгоритм управления трансмиссией предложен в работе [13].

Таблица 3

Краткие технические характеристики электромеханической трансмиссии трехосной КМ

Параметр	Значение
Мощность тягового электродвигателя, кВт	51
Передаточное число колесного редуктора	15,3
Максимальная скорость вращения вала тягового электродвигателя, об/мин	6 500
Максимальный крутящий момент тягового электродвигателя, Нм	2 000

Критерии эффективности работы тягового привода многоосных колесных машин при движении по неровностям деформируемого опорного основания

Эффективность работы тягового привода при прохождении участка местности с неровным деформируемым опорным основанием будем оценивать по следующим параметрам.

1. Среднеквадратическое значение коэффициента скольжения $СКЗ_{Si}$ для всех ведущих колес.
2. Средняя степень неравномерности ε буксования ведущих колес (1):

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} СКЗ_{Si}}{n_k} \quad (1)$$

3. Среднеквадратическое значение глубины колеи $СКЗ_{Hr}$ для левого и правого борта.
4. Интегральная мощность N , затрачиваемая на преодоление сопротивления движению, которая определяется по формуле (2):

$$N = \sum_{i=1}^{n_k} \frac{1}{T} \int_0^T M_i \omega_{ki} dt, \quad (2)$$

где T – время движения; M_i – суммарный момент сопротивления на i -м колесе; ω_{ki} – угловая скорость вращения i -го колеса.

Все критерии взаимосвязаны. Величина $СКЗ_{Si}$ (фактически степень буксования колес) влияет на глубину образуемой колеи, которая, в свою очередь, оказывает влияние на затраты мощности на преодоление участка местности.

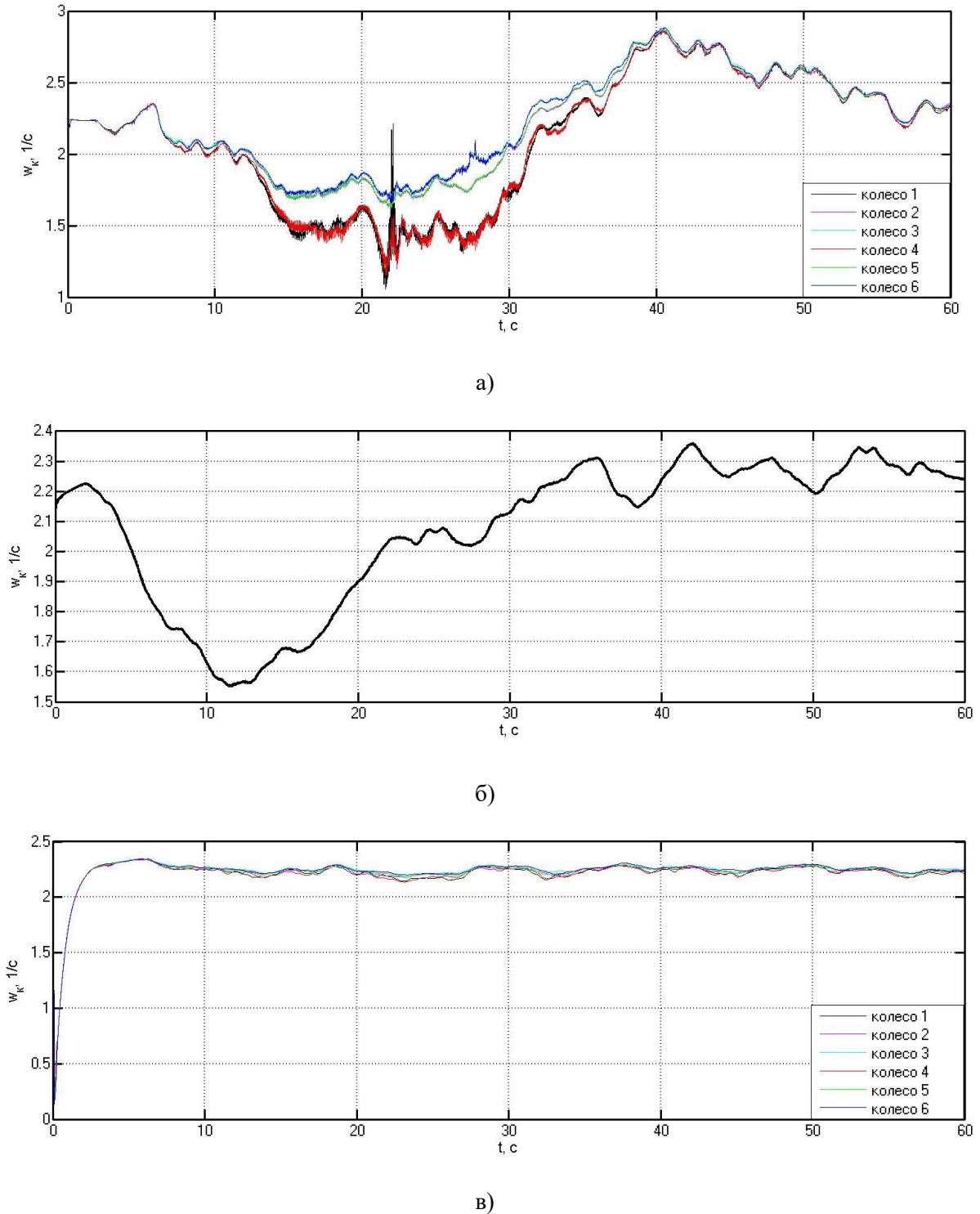


Рис. 4. Зависимости угловых скоростей колес от времени при движении КМ:
а – механическая трансмиссия, б – блокированная трансмиссия,
в – электромеханическая трансмиссия

Результаты моделирования прямолинейного движения трехосной колесной машины по деформированному грунту

Моделировалось движение МКМ по прямой при следующих управляющих воздействиях со стороны водителя.

1. ИТЭП – регулируемая степень нажатия на педаль подачи топлива для поддержания скорости движения 5 км/ч.
2. МЗКТ-6001 с дифференциальным и заблокированным приводом – регулируемая степень нажатия на педаль подачи топлива для поддержания скорости движения 5 км/ч, на первой передаче с заблокированным гидротрансформатором.

На рис. 4 а-в представлены зависимости угловых скоростей вращения колес от времени при движении КМ для механической, заблокированной и электромеханической трансмиссий соответственно. Как видно из рис. 4, степень неравномерности вращения колес КМ с ИТЭП гораздо меньше, чем у КМ с механической дифференциальной трансмиссией МЗКТ-6001. Зависимость интегральной мощности N от времени для всех трех типов тягового привода показана на рис. 5.

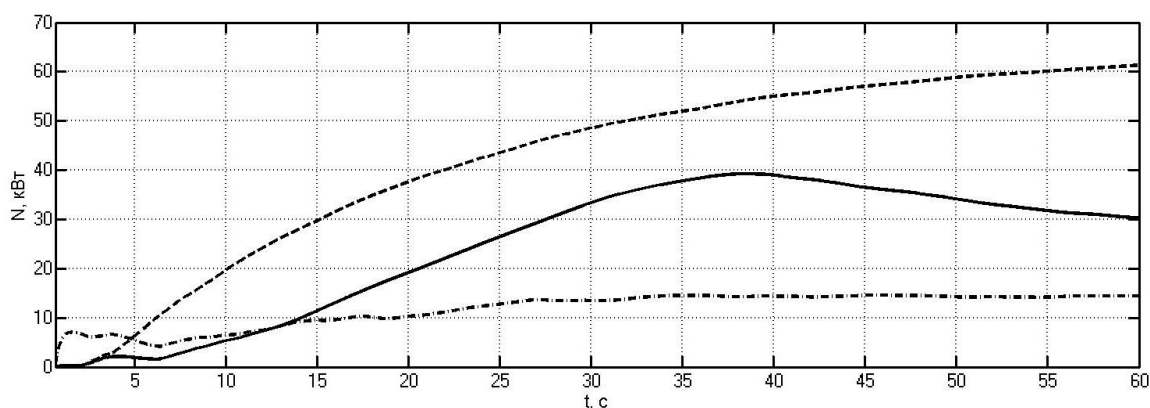


Рис. 5. Зависимость интегральной мощности N от времени:
 сплошная линия – механическая трансмиссия,
 пунктирная линия – заблокированная трансмиссия,
 штрихпунктирная линия – электромеханическая трансмиссия

Сравнение результатов моделирования прямолинейного движения трехосной колесной машины с различными типами трансмиссии по деформированному грунту

В табл. 4 приведены значения $СКЗ_S$ и ϵ для КМ со всеми тремя типами трансмиссии для каждого колеса; в табл. 5 – значения $СКЗ_{Hr}$ для левого и правого борта КМ со всеми тремя типами трансмиссии.

Таблица 4

Значения $СКЗ_s$ и ε для КМ со всеми тремя типами трансмиссии для каждого колеса

Номер колеса	Тип тягового привода		
	Механический	Блокированный	Электромеханический
	СКЗ _{Si}		
1	0,77	4,95	0,067
2	0,36	0,38	0,105
3	0,72	0,36	0,156
4	0,39	5,04	0,067
5	0,40	0,44	0,11
6	0,69	0,37	0,16
ε	0,56	1,93	0,056

Таблица 5

Значения СКЗ_{Нг} для КМ со всеми тремя типами трансмиссии для каждого колеса

Тип тягового привода	СКЗ _{Нг} , м	
	левый борт	правый борт
Механический	0,28	0,27
Блокированный	0,45	0,46
Электромеханический	0,10	0,10

Анализ приведенных результатов моделирования прямолинейного движения трехосной КМ по неровному деформируемому основанию типа «сухой песок» показывает, что предложенный алгоритм управления индивидуальным тяговым электроприводом является эффективным с точки зрения как опорной проходимости машины, так и затрат мощности на преодоление одного и того же участка местности при прямолинейном движении. Средняя степень неравномерности буксования ведущих колес КМ с ИТЭП на 90 % меньше, чем у машины с дифференциальной трансмиссией, и на 97 % меньше, чем у КМ с блокированной трансмиссией. Среднеквадратическое значение глубины образуемой колеи у КМ с ИТЭП на 78,3 % меньше, чем у КМ с блокированным приводом, и на 64 % меньше, чем у КМ с механической трансмиссией типа МЗКТ-6001. Интегральная мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления движению, соответственно меньше на 75,8 % и на 50 %.

Результаты моделирования движения трехосной колесной машины на подъем по деформированному грунту

Моделировалось движение трехосной КМ с тремя видами трансмиссии по ровному деформируемому опорному основанию на подъем 10°. Характеристики грунта приведены в табл. 1. Во время движения с помощью педали подачи топлива поддерживалась постоянная скорость движения 5 км/ч, для КМ с механической трансмиссией гидротрансформатор заблокирован, движение осуществлялось на первой передаче.

Моделирование движения КМ с механической трансмиссией МЗКТ-6001 (рис. 6) показало, что машина не смогла преодолеть такой участок местности. При въезде на подъем колеса передней оси начали пробуксовывать, в результате чего они погрузились в грунт, и КМ потеряла подвижность.

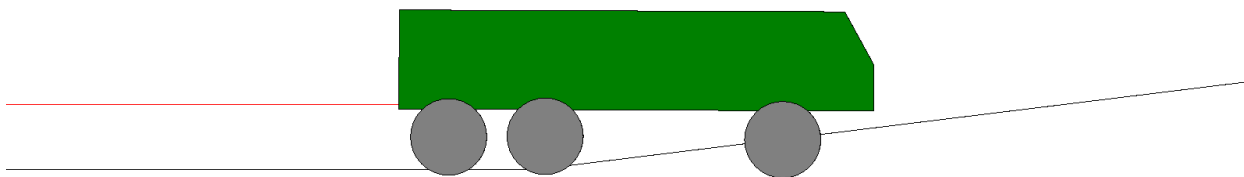


Рис. 6. Движение МАЗ 6001 на подъем

Для МАЗ 6001 на рис. 7 показана зависимость угловой скорости вращения колес от времени.

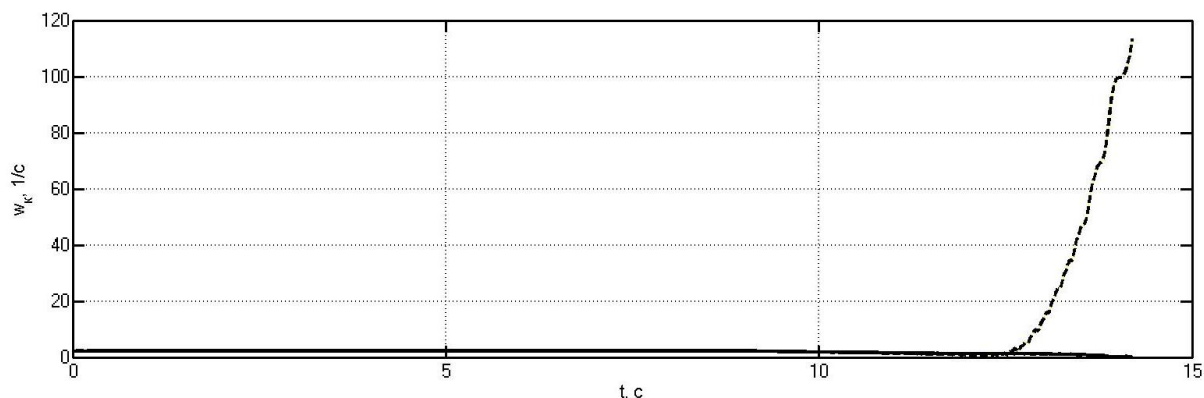


Рис. 7. Изменение угловой скорости вращения колес от времени для МЗКТ- 6001 при движении на подъем:

сплошная линия – для колес второй и третьей осей; пунктирная линия – для колес первой оси

На рис. 7 виден процесс развития буксования колес передней оси, обусловленный наличием несимметричного дифференциала между первой осью и задними осями.

Моделирование движения трехосной КМ с механической блокированной трансмиссией (рис. 8) показало, что машина не смогла преодолеть такой участок местности. В отличие от МЗКТ-6001, машина начала подъем, но завязла в песке. В результате мощности двигателя не хватило на преодоление сопротивления движению.

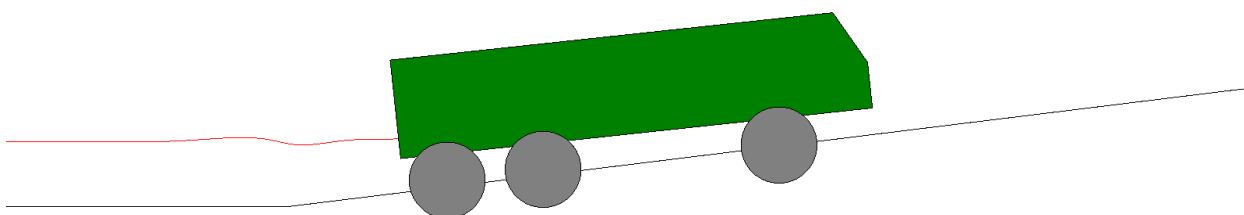


Рис. 8. Движение на подъем трехосной КМ с механической блокированной трансмиссией

Для трехосной КМ с механической блокированной трансмиссией на рис. 9 показано изменение угловой скорости вращения колес от времени.

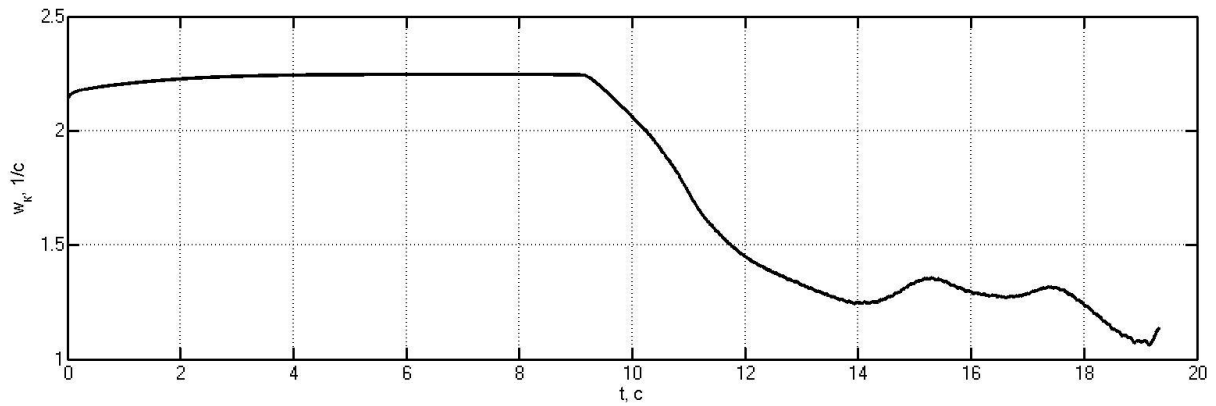


Рис. 9. Изменение угловой скорости вращения колес от времени для трехосной КМ с механической блокированной трансмиссией при движении на подъем

Моделирование движения трехосной КМ с ИТЭП (рис. 10) показало, что машина успешно преодолела подъем со скоростью около 4 км/ч.

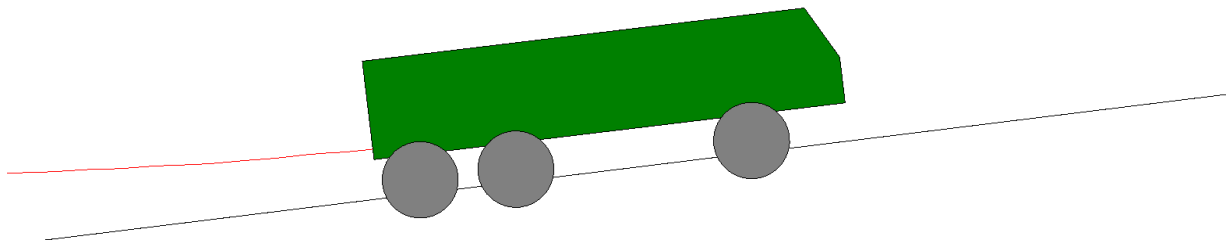


Рис. 10. Движение трехосной КМ с ИТЭП на подъем

Для трехосной КМ с ИТЭП на рис. 11 показана зависимость угловой скорости вращения колес от времени.

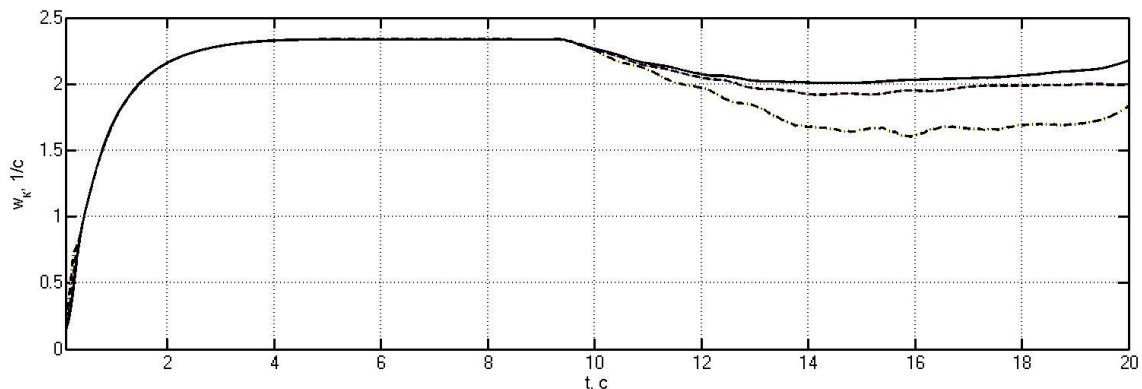


Рис. 11. Изменение угловой скорости вращения колес от времени для трехосной КМ с ИТЭП при движении на подъем:
сплошная линия – колеса первой оси; пунктирная линия – колеса второй оси;
штрих-пунктирная линия – колеса третьей оси

Степень неравномерности вращения ведущих колес КМ с ИТЭП (рис. 11) гораздо меньше, чем у КМ с механической дифференциальной трансмиссией МЗКТ-6001 (рис. 7).

Сравнивая результаты прохождения подъема трехосными колесными машинами с различными типами трансмиссий, можно констатировать, что при прочих равных условиях

только КМ с ИТЭП смогла успешно преодолеть рассматриваемый участок, что свидетельствует об эффективности предложенного алгоритма управления тяговыми электродвигателями.

Выводы

1. Предложены критерии эффективности работы тягового привода колесных машин при прохождении участка местности с неровным деформируемым опорным основанием, позволяющие проводить сравнительную оценку их опорной проходимости.
2. Методами имитационного моделирования движения многоосной колесной машины по деформируемому опорному основанию типа «сухой песок» установлено следующее.
 - 2.1 При прямолинейном движении среднеквадратическое значение глубины образуемой колеи у КМ с ИТЭП на 78,3 % меньше, чем у КМ с заблокированным приводом, и на 64 % меньше, чем у КМ с механической трансмиссией типа МЗКТ-6001. Интегральная мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления движению, соответственно меньше на 75,8 % и на 50 %. Средняя степень неравномерности буксования ведущих колес КМ с ИТЭП на 90 % меньше, чем у машины с дифференциальной трансмиссией и на 97 % меньше, чем у КМ с заблокированной трансмиссией.
 - 2.2 При движении на подъем 10° колесная машина с индивидуальным тяговым электроприводом ведущих колес успешно преодолела участок в отличие от машин с механической трансмиссией типа МЗКТ-6001 и с заблокированной трансмиссией, которые завязли в песке.

Библиографический список

1. **Горелов, В.А.** Синтез системы управления тяговыми электродвигателями для индивидуального привода ведущих колес автомобиля / В.А. Горелов, Г.О. Котиев, А.В. Мирошниченко // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2011. – В. 12, – №77–30569/282533.
2. Патент 2 426 660 RU МПК В 60 L 15/20, Н 02 Р 5/46 «Способ управления многоприводной электрической трансмиссией многоосной колесной машины» / С.А. Шеломков, А.А. Куприянов // Опубликовано 20.08.2011, бюл. №23.
3. **Горелов, В.А.** Разработка закона управления индивидуальным приводом движителей многоосной колесной машины / В.А. Горелов, Г.О. Котиев, А.В. Мирошниченко // Известия вузов. Машиностроение. – 2012. – №1. – С. 49-59.
4. **Плиев, И.А.** Алгоритмы управления мощностями, подводимыми к колесам полноприводных автомобилей / И.А. Плиев, А.М. Сайкин, Г.В. Коршунов, А.В. Архипов // Журнал автомобильных инженеров. – 2012. – №3(74). – С. 16-18.
5. **Маляревич, В.Э.** Повышение эксплуатационных свойств полноприводных автомобилей за счет индивидуального силового привода колес / В.Э. Маляревич, А.А. Эйдман, В.И. Прочно // Журнал автомобильных инженеров. – 2005. – №5(34). – С. 30-33.
6. **Jackson, A.** Improving Performance of a 6×6 Off-Road Vehicle Through Individual Wheel Control / A. Jackson, D. Crolla, A. Woodhouse, M. Parsons // SAE Technical Paper 2002-01-0968, 2002.
7. **Bauer, M.** Fuzzy logic traction controllers and their effect on longitudinal vehicle platoon systems / M. Bauer, M. Tomizuka // Vehicle system dynamics, Vol. 25, 1996. – P. 277-303.
8. **Жилейкин, М.М.** Теоретические основы повышения показателей устойчивости и управляемости колесных машин на базе методов нечеткой логики / М.М. Жилейкин. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 238 с.
9. **Жилейкин, М.М.** Разработка закона распределения моментов по колесам многоосной колесной машины с электромеханической трансмиссией, выполненной по схеме «мотор-ось» / М.М. Жилейкин, В.А. Середюк // Наука и образование. – 2014. – №5.

10. Горелов, В.В. Закон управления с функцией систем активной безопасности для электромеханических трансмиссий многоосных колесных машин / В.В. Горелов, М.М. Жилейкин, А.Н. Ловцов, В.А. Шинкаренко // Известия вузов. Машиностроение. – 2013. – №9. – С. 56-66.
11. Esmailzadeh, E. Optimal yaw moment control law for improved vehicle handling / E. Esmailzadeh, A. Goodarzi, G.R. Vossoughi // Mechatronics. – 2003. – №13, – P. 659-675.
12. Abe, M. Side-slip control to stabilize vehicle lateral motion by direct yaw moment / M. Abe, Y. Kano, K. Suzuki, Y. Shibahata, Y. Furukawa // JSAE Review 22. – 2001. – P. 413-419.
13. Вольская, Н.С. Алгоритм работы системы управления тяговыми электродвигателями при криволинейном движении многоосных колесных машин по неровностям деформируемого опорного основания / Н.С. Вольская, М.М. Жилейкин, А.Ю. Захаров // Известия вузов. Машиностроение. – 2018. – №3. – С. 33-40.
14. Жилейкин, М.М. Алгоритм работы системы управления индивидуальным тяговым электроприводом автопоезда с активным полуприцепом при криволинейном движении по неровностям деформируемого опорного основания / М.М. Жилейкин, А.Ю. Захаров // Журнал ассоциации автомобильных инженеров. – 2018. – №2 (109). – С. 16-20.
15. Вольская, Н.С. Математическая модель прямолинейного качения эластичного колеса по неровному деформируемому опорному основанию / Н.С. Вольская, М.М. Жилейкин, А.Ю. Захаров // Известия вузов. Машиностроение. – 2017. – №10. – С. 25-33.
16. Вольская, Н.С. Оценка проходимости колесных машин при движении по неровной грунтовой поверхности: монография / Н.С. Вольская. – М.: МГИУ, 2007. – 215 с.

*Дата поступления
в редакцию: 10.10.2019*

N.S. Volskaja, M.M. Zhileykin, A.J. Zakharov

COMPARATIVE PERFORMANCE OF MECHANICAL AND ELECTROMECHANICAL TRANSMISSIONS OF MULTI-WHEELED VEHICLES WHEN DRIVING ON UNEVEN DEFORMABLE SUPPORT BASE

Bauman Moscow State Technical University

Purpose: multi-wheeled vehicles (MWV) are currently used in transmission of different types (mechanical, hydraulic and Electromechanical, hydrostatic, combined). Despite the fact that the problem of effective distribution of moments wheels dedicated many works both domestic and foreign researchers, the analysis of theoretical and practical developments have shown that currently no uniform criteria for evaluating the performance of different schemes of transmission and distribution of power at the wheels.

Design/methodology/approach: the study effectiveness mechanical and Electromechanical transmissions of MWV when driving on uneven deformable support base.

Findings: a comparative analysis of the effectiveness of mechanical and Electromechanical transmissions of MWV when driving on uneven deformable support base on the basis of efficiency criteria.

Research limitations/implications: the carried out researches allow to apply the developed methods of research for forecasting of possibility of wheel cars on the deformable basis.

Originality/value: a comparative analysis of the effectiveness of mechanical and Electromechanical transmissions of multi-wheeled vehicles when driving on uneven deformable support base.

Key words: multi-wheeled machine, traction drive, the criteria for evaluating the effectiveness of a deformable support base, mechanical and electromechanical transmission.