

## Разработка закона распределения моментов по колесам многоосной колесной машины с электро-механической трансмиссией, выполненной по схеме «мотор-ось»

# 05, май 2014

DOI: 10.7463/0514.0705516

Жилейкин М. М.<sup>1</sup>, Середюк В. А.<sup>2</sup>

УДК 629.33

<sup>1</sup>Россия, МГТУ им. Баумана

<sup>2</sup>КАМАЗ

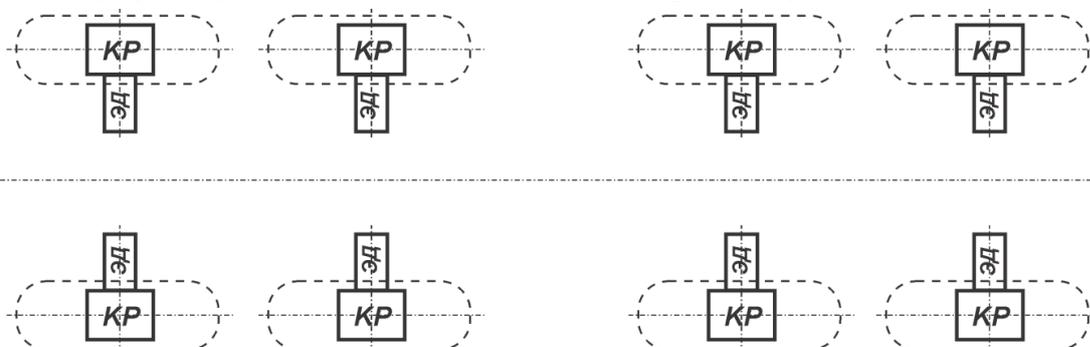
[jileykin\\_m@mail.ru](mailto:jileykin_m@mail.ru)

[sередюк\\_kmz@mail.ru](mailto:sередюк_kmz@mail.ru)

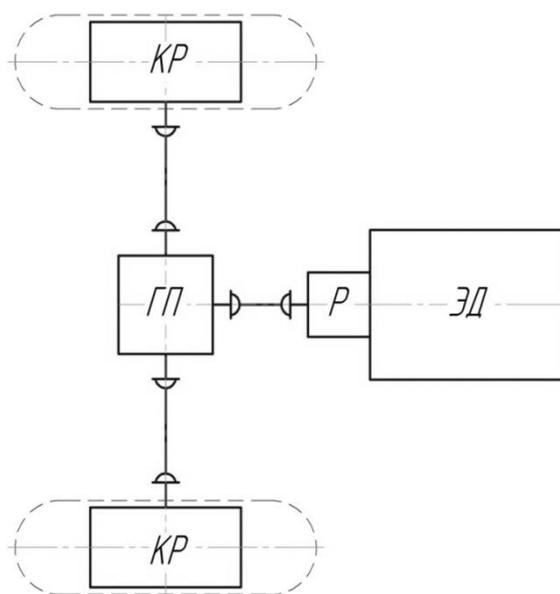
### Введение

В настоящее время в связи повышением требований к эксплуатационным показателям многоосных колесных машин (МКМ), таким как подвижность, быстроходность, проходимость разработчики таких машин все чаще применяют новые конструктивные, технологические и схемные решения, призванные обеспечить выполнение указанных требований. В конструкциях МКМ начинают использовать гидро- и электромеханические, гидрообъемные, комбинированные трансмиссии, позволяющие использовать гибкие алгоритмы управления тяговым моментом, подводимым к ведущим колесам [1].

Среди указанных типов тяговых приводов многоосных колесных машин наибольшее распространение получил индивидуальный тяговый электропривод (ТЭД) [2] – рис. 1а. Однако в последнее время все больший интерес разработчики проявляют к электромеханическому приводу, выполненному по схеме «мотор-ось» - рис. 1б.



а)



б)

**Рис. 1.** Схемы трансмиссии: а) индивидуальный ТЭП; б) «мотор-ось». Условные обозначения: КР – колесный редуктор; ГП – главная передача; Р – редуктор; ЭД - электродвигатель

Это обусловлено рядом преимуществ такой схемы по сравнению с индивидуальным ТЭП:

- 1) возможность применения более энерговооруженного тягового электродвигателя (ТЭД);
- 2) возможность уменьшения длины и повышение защищенности токоведущих частей;
- 3) в колесном узле машины высвобождается место для колесных тормозных механизмов;
- 4) упрощается система охлаждения ТЭД;
- 5) сокращается количество управляемых элементов (силовых преобразователей) в два раза;
- 6) ряд функций по распределению тягового момента возложены на классические схемы механических межколесных дифференциалов;
- 7) упрощается компоновка основных агрегатов мотор-оси, что позволяет использовать модульный принцип при разработке конструкции ходовой части МКМ.

В настоящее время известно немало количество работ, посвященных управлению индивидуальным тяговым приводом [2 – 12]. Однако при разработке таких схем ТЭП, как «мотор-ось», возникают проблемы, в первую очередь связанные с отсутствием опыта создания и готовых алгоритмических решений по управлению тяговыми электродвигателями. Использование методов, выполненных для индивидуального ТЭП, не представляется возможным, что обусловлено наличием в приводе ведущей оси межколесного дифференциала, не позволяющего управлять подводимым крутящим моментом каждого колеса в отдельности. Созданию таких алгоритмов управления тяговым электроприводом МКМ, выполненным по схеме «мотор-ось», посвящена данная работа.

## 1. Закон управления ТЭД в тяговом режиме

При разработке закона принят подход, исключающий описание внутренней динамики процессов, происходящих в электромеханических устройствах тягового привода.

В зоне контакта шины катящегося колеса с дорогой всегда имеет место проскальзывание элементов протектора шины. Особенно ярко это проявляется при движении по несущему основанию с низкими сцепными качествами (например, на льду). Повышенное буксование колес транспортного средства ухудшает тягово-сцепные свойства и может привести к частичной или полной потере подвижности.

Для устранения или уменьшения негативных последствий буксования необходимо производить регулирование величины крутящего момента, подводимого к ведущему мосту, согласуя его с потребным, исходя из тягово-сцепных свойств в контакте шины с грунтом. Применение тягового электропривода ведущих осей транспортного средства позволяет решить эту задачу. Для достижения поставленной цели необходимо выявлять буксующие колеса и снижать крутящий момент, подводимый к оси, на которой буксует колесо. Снижение момента должно производиться до тех пор, пока частота вращения колеса не снизится до величины эталонного значения.

При разработке алгоритма распределения тяговых моментов по ведущим мостам МКМ примем следующие допущения.

- 1) Кинематика поворота управляемых колес идеальна.
- 2) Хотя бы одно из колес транспортного средства не буксует.
- 3) Колесо, имеющее минимальную частоту вращения с учетом коэффициента изменения скорости, считается не буксующим.

Воспользуемся «велосипедной» расчетной схемой на примере машины с колесной формулой 8x8, представленной на рис. 2.

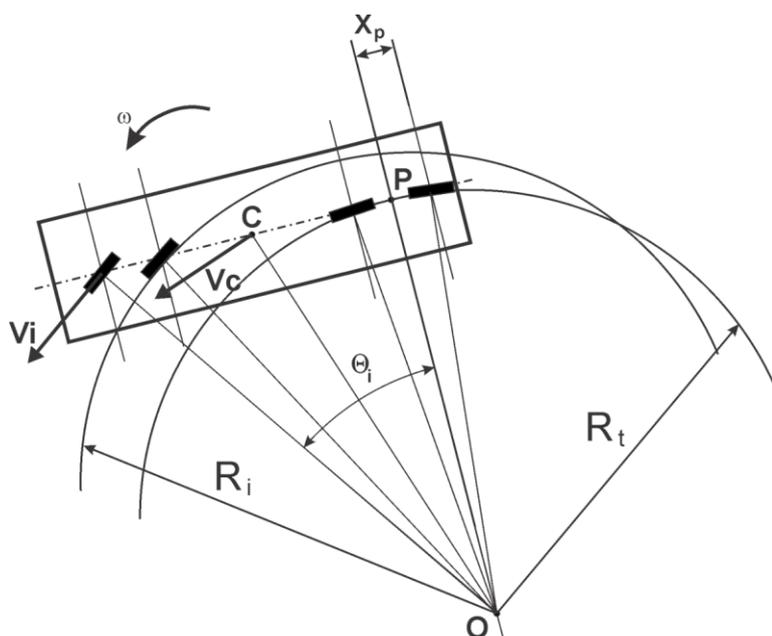


Рис. 2. Расчетная схема поворота транспортного средства.

$P$  – полюс рулевого управления,  $C$  – центр масс МКМ,  $O$  – мгновенный центр поворота,  $R_r$  – радиус поворота, измеренный по полюсу рулевого управления,  $R_i$  – радиус поворота по  $i$ -му колесу,  $V_i$  – линейная скорость движения центра  $i$ -го колеса,  $\omega$  – угловая скорость поворота транспортного средства

На первом этапе определяются средние угловые скорости вращения колес каждой оси по формуле

$$\omega_{\varphi j} = \frac{\omega_i + \omega_{i+\frac{N_k}{2}}}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, \frac{N_k}{2}, \quad j = 1, 2, \dots, N_{ось}, \quad (1)$$

где  $N_k$  – число колес МКМ;  $N_{ось}$  – число осей МКМ.

Далее определяется частота вращения условного "эталонного колеса", расположенного в полюсе поворота  $\omega_p$ , по выражению

$$\omega_p = \frac{\omega_{\varphi}^{\min}}{K_v}; \quad \omega_{\varphi}^{\min} = \min[\omega_{\varphi 1}; \omega_{\varphi 2}; \dots; \omega_{\varphi N_{ось}}] \quad (2)$$

Здесь  $K_v$  – коэффициент изменения угловой скорости вращения колеса [10]. Значение  $K_v$  берется для оси, средняя угловая скорость которой имеет минимальное значение. Теоретические частоты вращения колес каждой из осей вычисляются по выражению

$$\omega_{\varphi i}^T = \omega_p \cdot K_{vi}. \quad (3)$$

Уставка крутящего момента, который должен быть реализован на тяговом электродвигателе  $i$ -ой ведущей оси для обеспечения вращения колес этой оси с угловой скоростью  $\omega_{\varphi i}^T$ , определяется выражением

$$N_{d_{v_{\max}}} h = M_{d_{vi}} \cdot \omega_{\varphi i}^T, \quad (4)$$

где  $N_{d_{v_{\max}}}$  – максимальная мощность двигателя,  $h$  – степень использования мощности двигателя (нажатие педали «газ» [0;1]);  $M_{d_{vi}}$  – выходной момент  $i$ -го двигателя.

Внешняя характеристика электродвигателя соответствует графику, представленному на рис. 3. Введены следующие ограничения:

- 1) выходной момент ограничен максимальным значением  $M_{d_{v_{\max}}}$ ;
- 2) выходной момент ограничивается внешней характеристикой электродвигателя (ограничение по максимальной мощности)  $N_{d_{v_{\max}}}$ ;
- 3) угловая скорость вращения колеса ограничена (ограничение по максимальной скорости движения)  $\omega_{k_{\max}}$ .

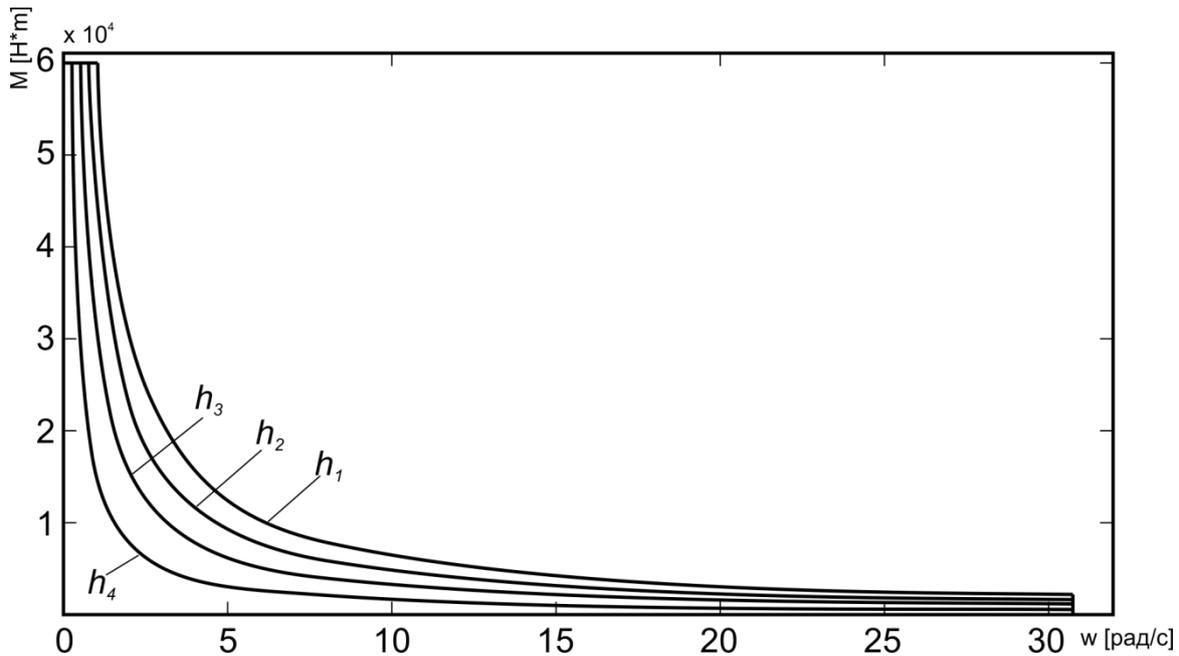


Рис. 3. Характеристики тягового электродвигателя, приведенные к скорости вращения движителя

$$h_1 = 1, h_2 = 0.75 \times h_1, h_3 = 0.5 \times h_1, h_4 = 0.25 \times h_1.$$

Пробуксовка колес определяется из условия

$$\omega_{\varphi i} > \omega^T_{\varphi i}, \quad (5)$$

где  $\omega_{\varphi i}$  – определяется по формуле (3) на основании замеренных угловых скоростей вращения колес МКМ.

В этом случае необходима корректировка крутящего момента  $M_{dvi}$  в сторону уменьшения его значения. При выполнении условия (5) значение  $M_{dvi}$  вычисляется по формуле

$$M_{dvi} = \frac{N_{dv_{\max}} h}{\left( \frac{\omega_{\varphi i} - \omega^T_{\varphi i}}{\omega^T_{\varphi i}} + 1 \right) \cdot \omega_{i\varphi}} = \frac{N_{dv_{\max}} h}{\left( \frac{\omega_{\varphi i}}{\omega^T_{\varphi i}} \right) \cdot \omega_{\varphi i}}. \quad (6)$$

## 2. Закон управления ТЭД в тормозном режиме

Суммарный тормозной момент  $M_{mopi}$  на  $i$ -ом движителе МКМ складывается из двух составляющих: тормозного момента  $M_{\partial/m_i}$ , создаваемого ТЭД оси в генераторном режиме, и тормозного момента  $M_{Mex/m_i}$ , реализуемого за счет действия механической части системы торможения МКМ:

$$M_{mopi} = M_{\partial/m_j} + M_{Mex/m_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N_k, \quad j = 1, 2, \dots, N_{osy}. \quad (7)$$

Суммарный тормозной момент реализуется за счет нажатия водителем на педаль «тормоз».

Принцип формирования  $M_{mopj}$  на всех колесах предлагается следующий. При нажатии водителем на педаль тормоза в систему управления ТЭД поступает сигнал  $h=[-1; 0]$  (при этом  $h=-1$  – полное нажатие на педаль тормоза). Действие электрического торможения предлагается во всем скоростном диапазоне торможения.

Величина  $M_{\partial/m_i}$  определяется следующим образом. Если

$$M_{mopj} = \frac{N_T^{\max} \cdot h}{\omega_{\varphi i}^T} \leq M_{\partial/m_i}^{\max} = \frac{N_{d_{v_{\max}}}}{\omega_{\varphi i}^T}, \quad j = 1, 2, \dots, N_k; \quad i = 1, 2, \dots, N_{o.sy}, \quad (8)$$

то тогда

$$M_{\partial/m_i} = \frac{N_T^{\max} \cdot h}{\omega_{\varphi i}^T} \rightarrow M_{Mex/m_j} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, N_k, \quad i = 1, 2, \dots, N_{o.sy}. \quad (9)$$

Если

$$M_{mopj} = \frac{N_T^{\max} \cdot h}{\omega_{\varphi i}^T} > M_{\partial/m_i}^{\max} = \frac{N_{d_{v_{\max}}}}{\omega_{\varphi i}^T}, \quad j = 1, 2, \dots, N_k, \quad i = 1, 2, \dots, N_{o.sy}, \quad (10)$$

то тогда

$$M_{\partial/m_i} = \frac{N_{d_{v_{\max}}}}{\omega_{\varphi i}^T} \rightarrow M_{Mex/m_j} = M_{mopj} - M_{\partial/m_i}, \quad j = 1, 2, \dots, N_k, \quad i = 1, 2, \dots, N_{o.sy}. \quad (11)$$

По зависимости (11) определяется добавочная доля тормозного момента от механической части системы торможения, необходимая для обеспечения требуемого уровня замедления МКМ, которая должна быть реализована исполнительными устройствами механического тормоза.

Для исключения блокировки колес при торможении в таких условиях предлагается дополнить разработанный закон для тормозной системы алгоритмом антиблокировочной системы.

В связи с тем, что длительность включения механической части тормозной системы МКМ ограничивается по условиям теплонапряженности, а блокировка колес возможна, в том числе, электрическими тормозами при средних и низких скоростях движения, алгоритм работы ABS касается только электрической части тормозной системы МКМ.

Опасность блокировки колес при торможении определяется из условия

$$\omega_{\varphi i} < \omega_{\varphi i}^T, \quad i = 1, 2, \dots, N_{o.sy}. \quad (12)$$

В этом случае  $\omega_{\varphi i}^T$  определяется на основе самого «быстрого» колеса. При выполнении условия (12) необходима корректировка момента  $M_{\varepsilon/m_i}$  в сторону его уменьшения по абсолютному значению. Тогда, если

$$M_{\text{мо}p_j} = \frac{N_T^{\text{ма}x} \cdot h}{\omega_{\varphi i}^T} \leq M_{\varepsilon/m_i}^{\text{ма}x} = \frac{N_{d_{v_{\text{ма}x}}}}{\omega_{\varphi i}^T}, \quad j=1,2,\dots, N_k, \quad i=1,2,\dots, N_{o.sy},$$

то

$$M_{\varepsilon/m_i} = \frac{N_T^{\text{ма}x} \cdot h}{\left(\frac{\omega_{\varphi i}^T}{\omega_{\varphi i}}\right) \omega_{\varphi i}^T} \rightarrow M_{\text{М}ex/m_j} = 0, \quad j=1,2,\dots, N_k, \quad i=1,2,\dots, N_{o.sy}. \quad (13)$$

Если

$$M_{\text{мо}p_j} = \frac{N_T^{\text{ма}x} \cdot h}{\omega_{\varphi i}^T} > M_{\varepsilon/m_i}^{\text{ма}x} = \frac{N_{d_{v_{\text{ма}x}}}}{\omega_{\varphi i}^T}, \quad j=1,2,\dots, N_k, \quad i=1,2,\dots, N_{o.sy},$$

то тогда

$$M_{\varepsilon/m_i} = \frac{N_{d_{v_{\text{ма}x}}}}{\left(\frac{\omega_{\varphi i}^T}{\omega_{\varphi i}}\right) \omega_{\varphi i}^T} \rightarrow M_{\text{М}ex/m_j} = M_{\text{мо}p_j} - M_{\varepsilon/m_i}; \quad j=1,2,\dots, N_k; \quad i=1,2,\dots, N_{o.sy}. \quad (14)$$

Если среднее значение угловых скоростей всех колес  $\omega_{\varphi} = 0$ , то  $M_{\varepsilon/m_i} = 0$ ,  $i=1,2,\dots, N_{o.sy}$ .

### 3. Анализ работоспособности закона распределения крутящих моментов по колесам с функцией систем активной безопасности для многоосных колесных машин с электромеханической трансмиссией, выполненной по схеме «мотор-ось»

С целью подтверждения работоспособности закона распределения мощности по колесам, а также для проверки возможности организации на практике разработанной системы управления тяговыми электродвигателями, были проведены теоретические исследования с помощью имитационного математического моделирования. Особенности математической модели движения МКМ рассмотрены в [13 – 15].

Представлены результаты численного моделирования движения МКМ с колесной формулой 8x8 с симметричными межколесными дифференциалами полной массой 60 т с подведением мощности к двигателям по предложенному закону и управлением тяговыми электродвигателями «по моменту». Моделируется вход и движение в повороте с фиксиро-

ванным радиусом ( $R = 21$  м), МКМ начинает двигаться со скоростью  $V = 20$  км/ч. Исследуется движение на двух типах опорного основания: на опорном основании «сухой лед» (с коэффициентом взаимодействия движителя с опорным основанием при полном буксовании  $\mu_{\max} = 0,1$ ) и на опорном основании «грунт» (с коэффициентом взаимодействия движителя с опорным основанием при полном буксовании  $\mu_{\max} = 0,6$ ). Отметим, что под термином «опорное основание» понимается только твердая недеформируемая опорная поверхность. Все колеса автомобиля являются управляемыми. При моделировании использован закон управления поворотом колес, описанный в работах [16].

Поворот МКМ исследовался при постоянном уровне воздействия на педаль акселератора; угол поворота рулевого колеса изменяется от нуля до заданного значения в течение 1-ой секунды и далее остается неизменным. На рис. 4 показаны зависимости изменения углов поворота управляемых колес от времени.

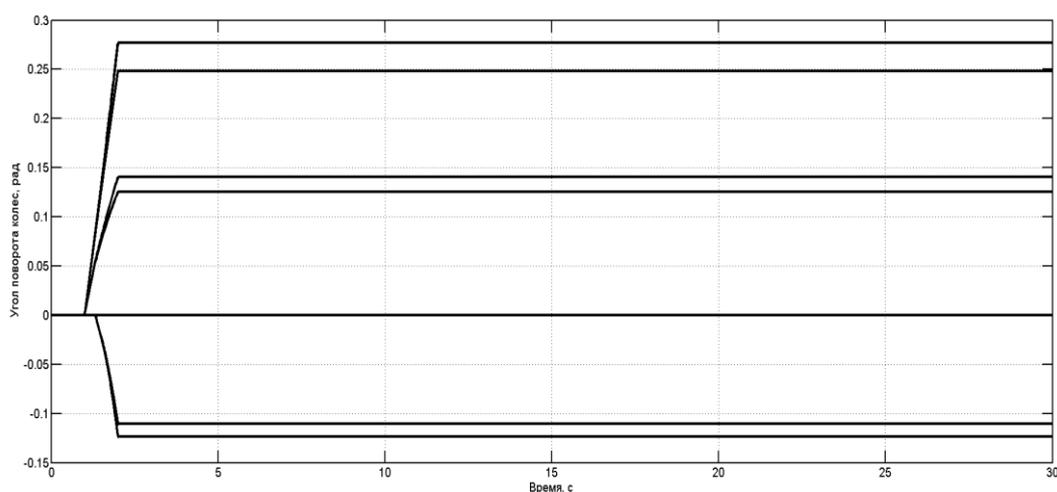


Рис. 4. Углы поворота колес

Результаты моделирования представлены на рис. 5 – 10.

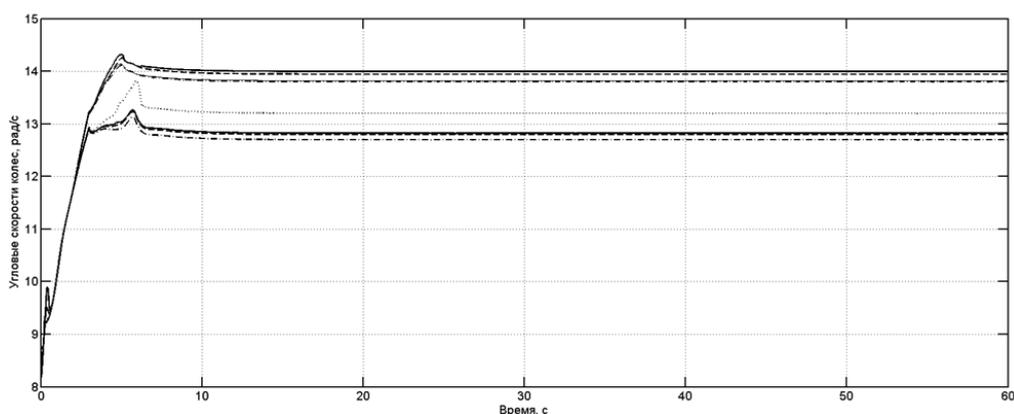


Рис. 5. Угловые скорости колес (поворот на опорном основании «грунт»)

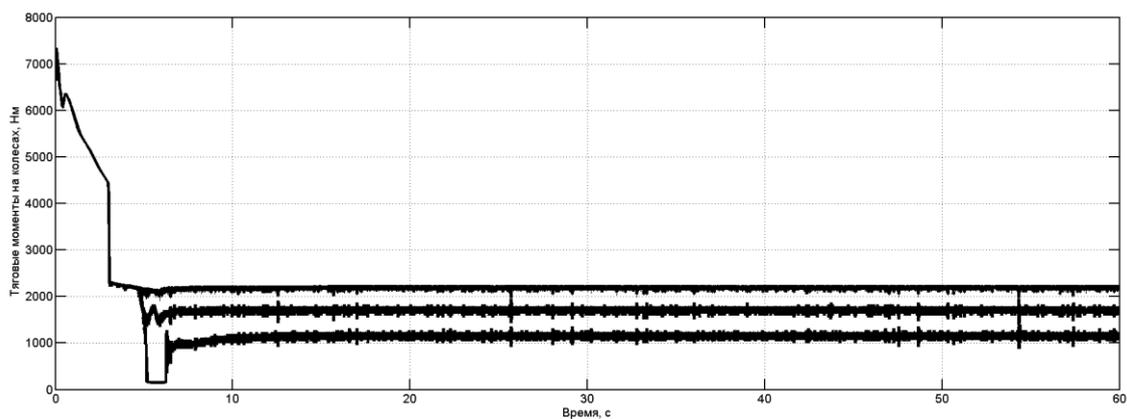


Рис. 6. Крутящие моменты на колесах (поворот на опорном основании «грунт»)

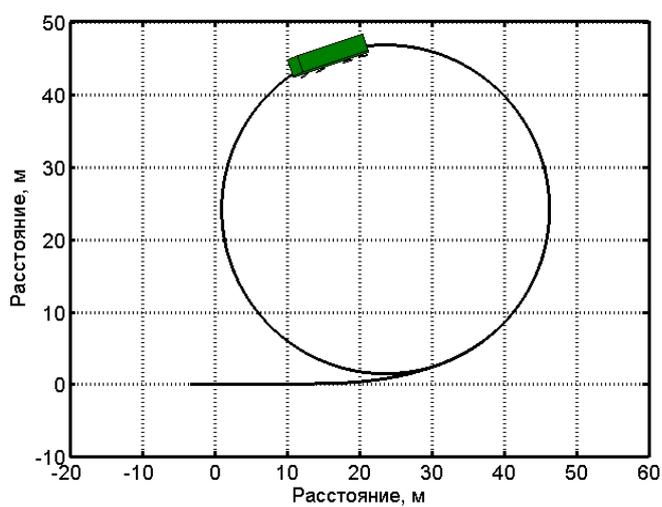


Рис. 7. Траектория движения МКМ (поворот на опорном основании «грунт»)

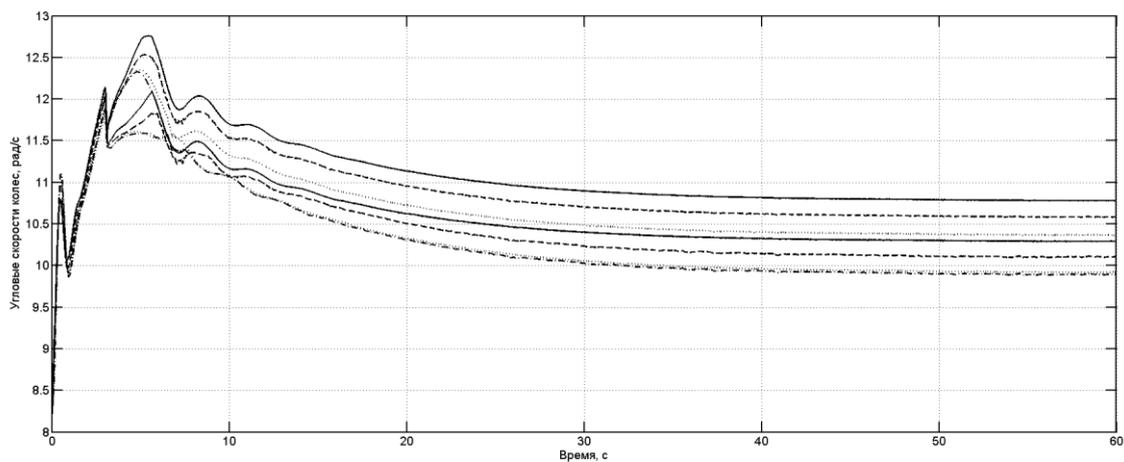


Рис. 8. Угловые скорости колес (поворот на опорном основании «сухой лед»)

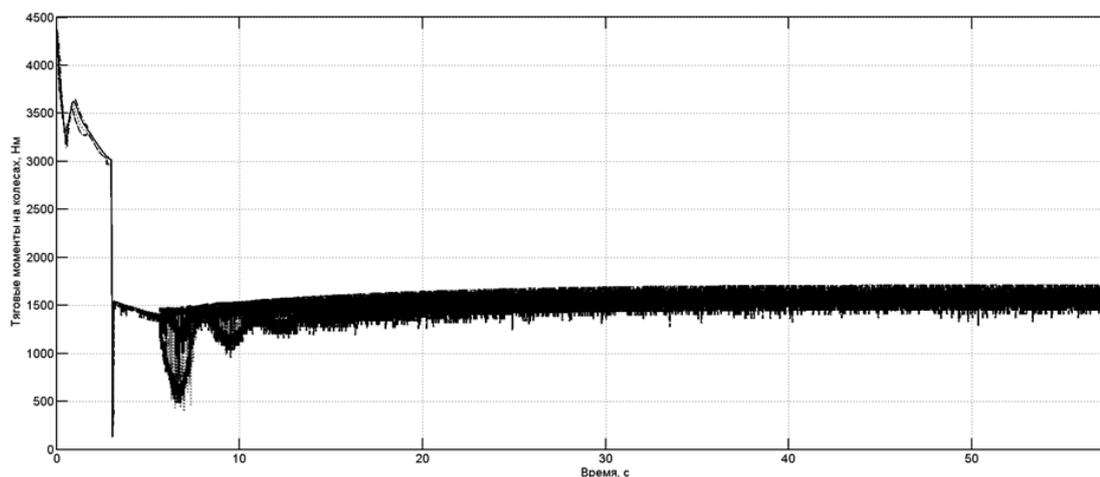


Рис. 9. Крутящие моменты на колесах (поворот на опорном основании «сухой лед»)

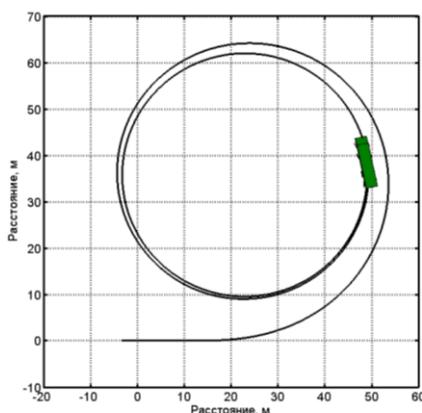


Рис. 10. Траектория движения МКМ (поворот на опорном основании «сухой лед»)

Переставка МКМ моделировалась при постоянных управляющих воздействиях со стороны водителя:  $h=0,5$  (на «грунтовом основании») и  $h=0,3$  («сухой лед»). На рис. 11 показаны зависимости изменения углов поворота управляемых колес от времени.

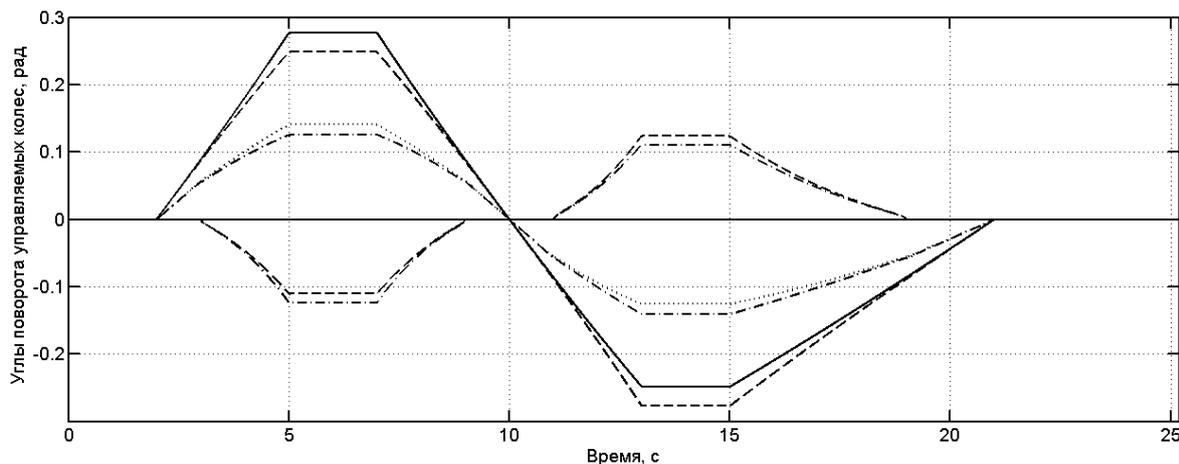


Рис. 11. Углы поворота колес при переставке Результаты моделирования представлены на рис. 12 – 17.

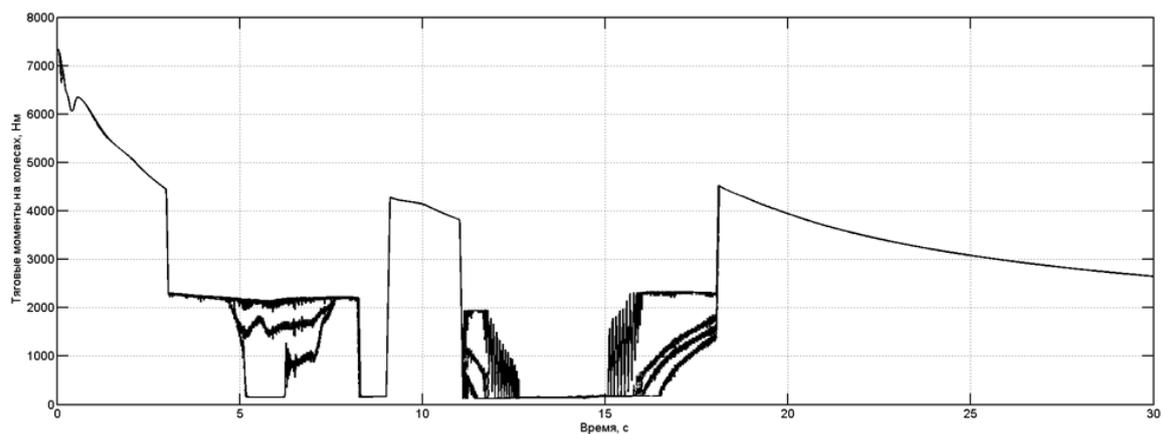


Рис. 12. Крутящие моменты на колесах (переставка на опорном основании «грунт»)

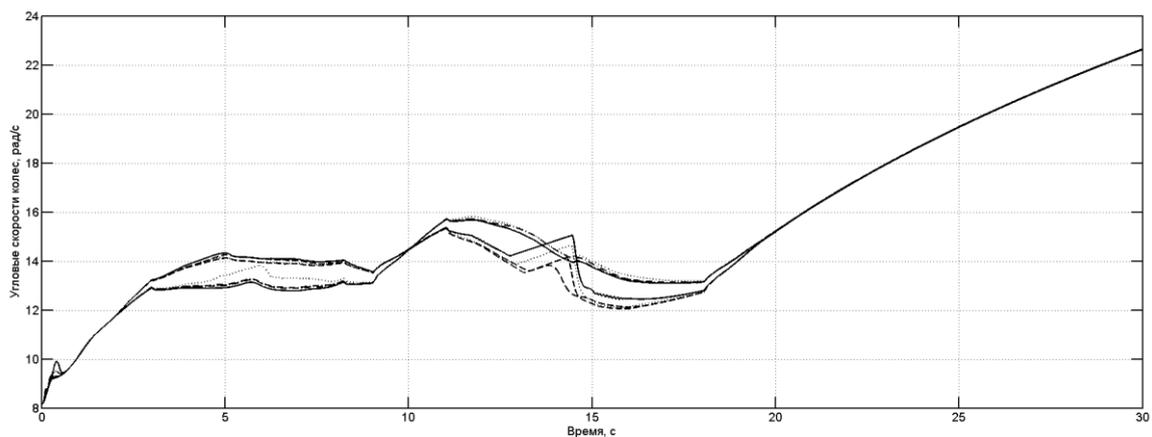


Рис. 13. Угловые скорости колес (переставка на опорном основании «грунт»)

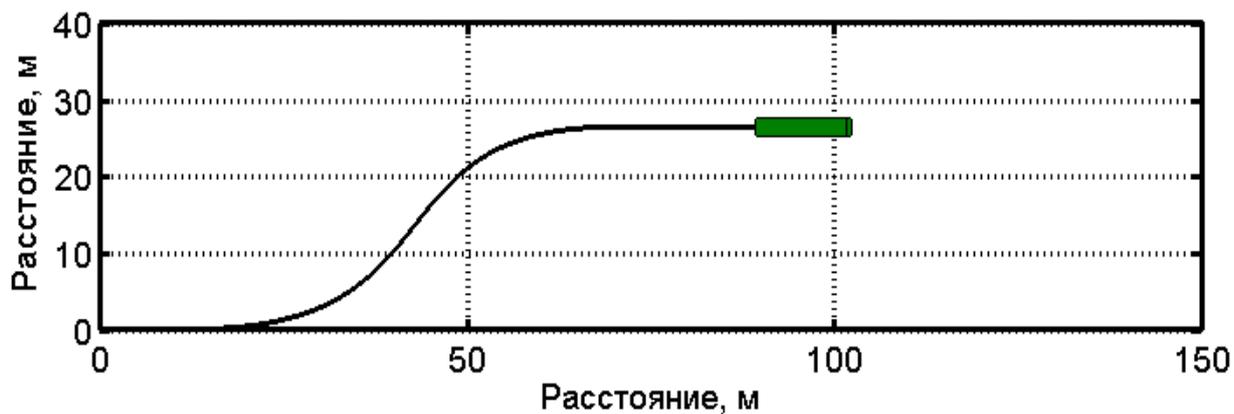
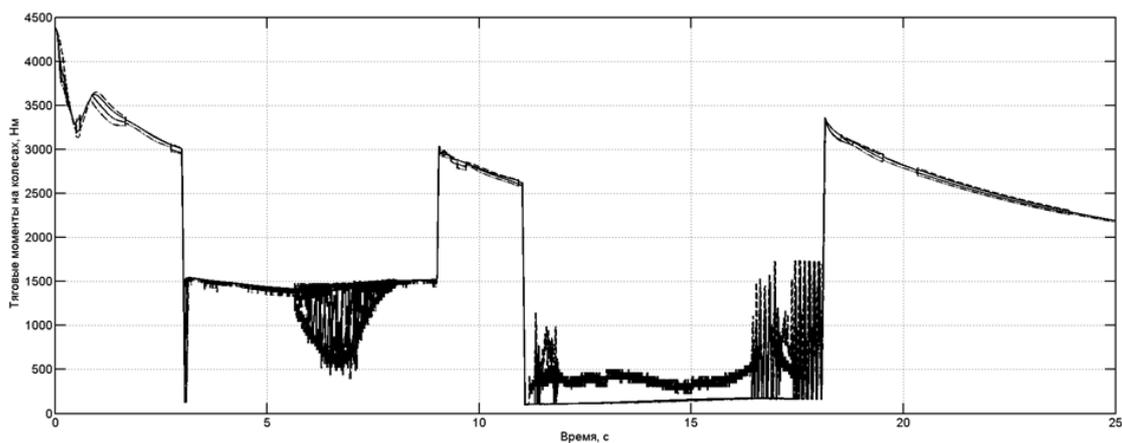
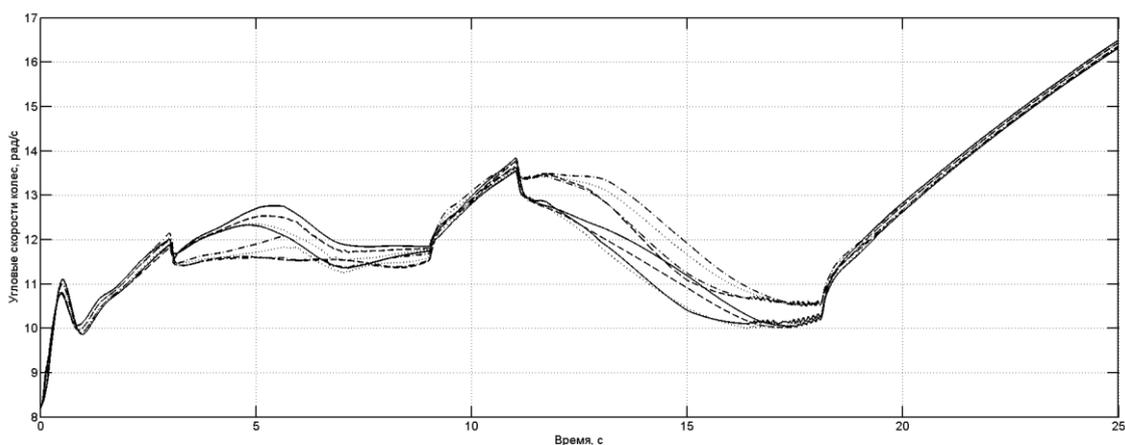


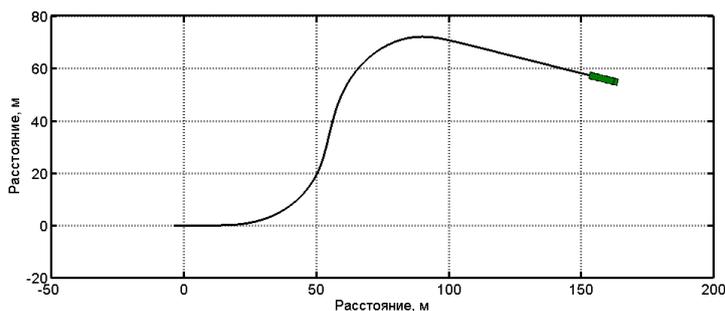
Рис. 14. Траектория движения МКМ (переставка на опорном основании «грунт»)



**Рис. 15.** Крутящие моменты на колесах (переставка на опорном основании «сухой лед»)



**Рис. 16.** Угловые скорости колес (переставка на опорном основании «сухой лед»)



**Рис. 17.** Траектория движения МКМ (переставка на опорном основании «сухой лед»)

Анализ результатов имитационного моделирования показывает, что разработанный закон управления тяговым электроприводом ведущих осей МКМ, включающий в себя алгоритм управления тяговыми и тормозными моментами на ведущих колесах, а также алгоритмы работы противобуксовочной и антиблокировочной систем, является работоспособным. При стационарном (поворот с постоянной скоростью) и нестационарном (переставка) маневрировании не возникало пробуксовывания колес машины. Угловые скорости

колес (рис. 5, 8, 13, 16) изменяются плавно. Частичная потеря курсовой устойчивости при совершении маневров на льду (рис. 10, 17) может быть парирована разработкой алгоритмов динамической стабилизации, которые позволят повысить курсовую и траекторную устойчивость МКМ. Для окончательного ответа о работоспособности и эффективности разработанного закона управления требуется проведение натурных испытаний многоосной колесной машины с тягово-электрическим приводом по схеме «мотор-ось».

### **Выводы**

- 1) Разработан закон управления тяговым электроприводом ведущих осей МКМ, включающий в себя закон управления тяговыми и тормозными моментами на ведущих колесах, а также алгоритмы работы противобуксовочной и антиблокировочной систем.
- 2) Методами имитационного математического моделирования при выполнении МКМ маневров поворот и переставка доказана работоспособность предложенного универсального закона управления электромеханическими трансмиссиями, выполненными по схеме «мотор-ось», сочетающего функции распределения мощности по колесам и работы систем активной безопасности (антиблокировочной и противобуксовочной).
- 3) Для повышения устойчивости движения многоосных колесных машин с электромеханическими трансмиссиями, выполненных по схеме «мотор-ось» необходимо дополнить разработанный закон управления алгоритмами динамической стабилизации, которые позволят повысить курсовую и траекторную устойчивость МКМ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора №9905/17/07-к-12 между ОАО «КАМАЗ» и «Московским государственным техническим университетом имени Н.Э. Баумана»

### **Список литературы**

1. Шухман С.Б., Соловьев В.И., Прочко Е.И. Теория силового привода колес автомобилей высокой проходимости / Под общ. ред. д.т.н., проф. С.Б. Шухмана. М.: Агробизнесцентр, 2007. 336 с.
2. Горелов В.А., Котиев Г.О., Мирошниченко А.В. Синтез системы управления тяговыми электродвигателями для индивидуального привода ведущих колес автомобиля // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 12. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/282533.html> (дата обращения 01.04.2014).
3. Шеломков С.А., Купрянов А.А. Способ управления многоприводной электрической трансмиссией многоосной колесной машины: пат. 2426660 РФ. 2011. Бюл. № 23.

4. Маляревич В.Э., Эйдман А.А., Прочко В.И. Повышение эксплуатационных свойств полноприводных автомобилей за счет индивидуального силового привода колес // Журнал автомобильных инженеров. 2005. № 5 (34). С. 30-33.
5. Плиев И.А., Сайкин А.М., Коршунов Г.В., Архипов А.В. Алгоритмы управления мощностями, подводимыми к колесам полноприводных автомобилей // Журнал автомобильных инженеров. 2012. № 3 (74). С. 16-18.
6. Белоусов Б.Н., Попов С.Д. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет / Под общ. ред. Б.Н. Белоусова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 728 с.
7. Горелов В.А., Котиев Г.О., Мирошниченко А.В. Алгоритм управления индивидуальным приводом колесных движителей транспортных средств // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. Спец. вып. «Энергетическое и транспортное машиностроение». С. 39-58.
8. Горелов В.А., Котиев Г.О., Мирошниченко А.В. Разработка закона управления индивидуальным приводом движителей многоосной колесной машины // Известия вузов. Машиностроение. 2012. № 1. С. 49-59.
9. Горелов В.А., Котиев Г.О., Мирошниченко А.В. Математическая модель электромеханического тормозного управления колесной машины // Журнал автомобильных инженеров. 2012. № 2 (73). С. 38-43.
10. Горелов В.В., Жилейкин М.М., Ловцов А.Н., Шинкаренко В.А. Закон управления с функцией систем активной безопасности для электромеханических трансмиссий многоосных колесных машин // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2013. № 9. С. 56-66.
11. Jackson A., Crolla D., Woodhouse A., Parsons M. Improving Performance of a 6×6 Off-Road Vehicle Through Individual Wheel Control. SAE Technical Paper 2002-01-0968, 2002. DOI: [10.4271/2002-01-0968](https://doi.org/10.4271/2002-01-0968)
12. Bauer M., Tomizuka M. Fuzzy logic traction controllers and their effect on longitudinal vehicle platoon systems // Vehicle system dynamics. 1996. Vol. 25. P. 277-303.
13. Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Комплексное подрессоривание высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 184 с.
14. Горелов В.А., Котиев Г.О. Прогнозирование характеристик криволинейного движения автомобиля с колесной формулой 6×6 при различных законах управления поворотом колёс задней оси // Известия вузов. Машиностроение. 2008. № 1. С. 44-55.
15. Котиев Г.О., Чернышев Н.В., Горелов В.А. Математическая модель криволинейного движения автомобиля с колесной формулой 8×8 при различных способах управления поворотом // Журнал автомобильных инженеров. 2009. № 2 (55). С. 34-40.
16. Горелов В.А., Котиев Г.О., Тропин С.Л. «Веерный» закон для всеколесного рулевого управления многоосных колесных транспортных средств // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. № 2. С. 102-116.

## **A development of the distributive law of points on the multi-wheeled machine wheels with electro-mechanical transmission, made under the scheme "motor-axis"**

# 05, May 2014

DOI: 10.7463/0514.0705516

M.M. Jileikin, V.A. Sereduk

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Open Joint Stock Company KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, 423827, Russian Federation

[jileikin\\_m@mail.ru](mailto:jileikin_m@mail.ru)

[sereduk\\_kmz@mail.ru](mailto:sereduk_kmz@mail.ru)

Currently, developers of multi-wheeled vehicles (MWV) show growing interest in electro-mechanical drive in the «motor-axis» implementation. However, in designing the traction electric drive (TED) based on such approach the problems arise, primarily, from a lack of creating experience and of ready algorithmic solutions to control the traction motors. The use of methods to implement the individual TED is impossible because of the presence of cross-axle differential in the leading axle drive, which does not allow the input torque control of each wheel singly. The paper offers a law to control a traction electric drive of MWV leading axles that comprises the law to control the tractive effort torque and braking moment on the leading axles as well as algorithms of anti-lock brake and traction control systems.

An analysis of simulation modeling results shows an efficiency of the developed law that allows control of the traction electric drive of MWV leading axles. The control law includes an algorithm to control the tractive effort torque and braking moment on the driving-wheels, as well as algorithms of anti-lock brake and traction systems.

At stationary (constant speed rotation) and non-stationary (elk test) maneuvering there was no spin of vehicle wheels. Angular speeds of the wheels vary smoothly. Partial loss of vehicle stability when making maneuvers on ice may be reduced through development of algorithms for dynamic stabilization, which will improve the MWV road-holding and trajectory ability. Full-scale tests of MWV with traction electric drive implemented using a “motor-axis” approach are required to have a final answer on the performance and effectiveness of the developed control law.

---

**Publications with keywords:** [torque](#), [angular velocity](#), [mathematical model](#), [power](#), [simulation modeling](#), [prop](#), [control law](#), [wheeled vehicle](#), [active safety](#), [traction electric drive](#), [motor-axis](#), [braking moment](#)

**Publications with words:** [torque](#), [angular velocity](#), [mathematical model](#), [power](#), [simulation modeling](#), [prop](#), [control law](#), [wheeled vehicle](#), [active safety](#), [traction electric drive](#), [motor-axis](#), [braking moment](#)

---

## References

1. Shukhman S.B., Solov'ev V.I., Prochko E.I. *Teoriya silovogo privoda koles avtomobiley vysokoy prokhodimosti* [Theory of power drive of wheels of all-terrain vehicles]. Moscow, Agrobiznestsentr Publ., 2007. 336 p. (in Russian).
2. Gorelov V.A., Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V. [Synthesis of control traction motor for individual drive wheeled vehicle]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana - Science and Education of the Bauman MSTU*, 2011, no. 12. Available at: <http://www.technomag.edu.ru/en/doc/282533.html> , accessed 01.04.2014. (in Russian).
3. Shelomkov S.A., Kupreyanov A.A. *Sposob upravleniya mnogoprivodnoy elektricheskoy transmissiyei mnogoosnoy kolesnoy mashiny* [Method of control of multi-drive electric transmission of multi-wheeled vehicles]. Patent RF, no. 2426660. 2011. (in Russian).
4. Malyarevich V.E., Eydman A.A., Prochko V.I. [Improving performance properties wheel drive vehicles due to individual power drive wheels]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*, 2005, no. 5 (34), pp. 30-33. (in Russian).
5. Pliev I.A., Saykin A.M., Korshunov G.V., Arkhipov A.V. [Control algorithms of the power delivered to the wheels of four-wheel drive]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*, 2012, no. 3 (74), pp. 16-18. (in Russian).
6. Belousov B.N., Popov S.D. *Kolesnye transportnye sredstva osobo bol'shoy gruzopod'emnosti. Konstruktsiya. Teoriya. Raschet* [Wheeled vehicles especially big load capacity. Design. Theory. Calculation]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 728 p. (in Russian).
7. Gorelov V.A., Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V. [Algorithm for Control of Individual Drive of Wheeled Propelling Agent of Transport Aids]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie - Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering*, 2011, Spec. iss. Energeticheskoe i transportnoe mashinostroenie [Energy and transport mechanical engineering], pp. 39-58. (in Russian).
8. Gorelov V.A., Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V. [Development of the control algorithm of individual drives for a multi-axle wheeled vehicle]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii*.

- Mashinostroenie - Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2012, no. 1, pp. 49-59. (in Russian).
9. Gorelov V.A., Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V. [Mathematical model of the electromechanical brake control wheel machine]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*, 2012, no. 2 (73), pp. 38-43. (in Russian).
  10. Gorelov V.V., Zhileykin M.M., Lovtsov A.N., Shinkarenko V.A. [A control law with the function of active safety systems for electromechanical transmissions of multi-wheeled vehicles]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie - Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 9, pp. 56-66. (in Russian).
  11. Jackson A., Crolla D., Woodhouse A., Parsons M. *Improving Performance of a 6×6 Off-Road Vehicle through Individual Wheel Control*. SAE Technical Paper 2002-01-0968, 2002. DOI: [10.4271/2002-01-0968](https://doi.org/10.4271/2002-01-0968)
  12. Bauer M., Tomizuka M. Fuzzy logic traction controllers and their effect on longitudinal vehicle platoon systems. *Vehicle System Dynamics*, 1996, vol. 25, pp. 277-303.
  13. Kotiev G.O., Sarach E.B. *Kompleksnoe podressorivanie vysokopodvizhnykh dvukhzvennykh gusenichnykh mashin* [Integrated cushioning high-mobility articulated tracked vehicle]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 184 p. (in Russian).
  14. Gorelov V.A., Kotiev G.O. [Predicting the characteristics of curvilinear motion of car with wheel formula 6X6 for different types of control of turning the rear axle wheels]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie - Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2008, no. 1, pp. 44-55. (in Russian).
  15. Kotiev G.O., Chernyshev N.V., Gorelov V.A. [Mathematical model of the curvilinear motion of vehicle with wheel formula 8 × 8 at various ways of turning control]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*, 2009, no. 2 (55), pp. 34-40. (in Russian).
  16. Gorelov V.A., Kotiev G.O., Tropin S.L. [Control Law of All-Wheel Steering for Multiaxis Wheeled Vehicles]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie - Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering*, 2012, no. 2, pp. 102-116. (in Russian).