

УДК 629.11.01

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-4-35-41

Повышение устойчивости и управляемости двухосных автомобилей с подключаемой передней осью путем перераспределения крутящих моментов между осями

М.М. Жилейкин, А.В. Эраносян

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Improving Stability and Controllability of Two-Axial Vehicles with a Connectable Front Axle by Redistributing Torque between the Axles

M.M. Zhileykin, A.V. Eranosyan

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: jileykin_m@mail.ru, artem_bmstu@mail.ru



Самыми распространенными схемами управляемого привода автомобилей с колесной формулой 4×4 являются схемы с постоянным приводом на переднюю ось и подключаемой задней осью. Алгоритмы управления такими трансмиссиями достаточно подробно проработаны. Реже на практике встречаются двухосные автомобили с подключаемой передней осью, для которых вопросы повышения устойчивости движения путем перераспределения крутящих моментов между осями изучены в гораздо меньшей степени. Предложен метод повышения устойчивости и управляемости автомобилей с колесной формулой 4×4 и подключаемой передней осью путем перераспределения крутящих моментов между осями. Методами имитационного моделирования движения таких двухосных автомобилей доказаны эффективность и работоспособность предложенного метода.

Ключевые слова: стабилизация движения автомобиля, курсовая устойчивость, система динамической стабилизации, перераспределение крутящих моментов



The most common schemes of 4×4 drives are those where the front axle is permanently fixed to the drive shaft and the back axle can be connected selectively. Control algorithms for such transmissions are well established. Two-axle vehicles with a connectable front axle are rarer, and questions related to increasing their road stability through redistribution of torque between the axles are studied considerably less. The authors propose a method of increasing stability and controllability of 4×4 vehicles with a connectable front axle by redistributing torque between the axles. The efficiency and performance of the proposed method is confirmed by the simulation of motion of such two-axle vehicles.

Keywords: stabilization of vehicle motion, roadholding ability, dynamic stabilization system, torque redistribution

Исследование тенденций развития современного автомобилестроения показывает, что производители постоянно повышают уровень контроля над параметрами движения колесных транспортных средств, добиваясь максимального уровня их устойчивости и управляемости.

В настоящее время вопросами создания систем активной безопасности автомобилей, обеспечивающих повышение устойчивости и управляемости, активно занимаются за рубежом. Работы ведутся по двум направлениям. Во-первых, создаются системы динамической стабилизации, принцип действия которых основан на изменении крутящих моментов, подводимых к ведущим колесам. Все более актуальным и целесообразным становится применение различных систем полного привода. Распределение тягового усилия на все колеса позволяет использовать вес автомобиля в качестве сцепного, что положительно сказывается на его динамических качествах и проходимости, позволяет реализовать алгоритмы управления, улучшающие управляемость и курсовую устойчивость машины. Разработке этих методов посвящено много работ, в частности [1, 2].

Во-вторых, повышение устойчивости и управляемости обеспечивается путем введения автоматического корректирующего изменения угла поворота управляемых колес (подруливания) [3, 4]. Возможно и комбинированное управление на основе указанных подходов [5].

Самыми распространенными схемами управляемого привода автомобилей с колесной формулой 4×4 являются схемы с постоянным приводом на переднюю ось и подключаемой задней осью. Алгоритмы управления такими трансмиссиями достаточно подробно проработаны [6]. Реже на практике встречаются двухосные транспортные средства с подключаемой передней осью, для которых вопросы повышения устойчивости движения путем перераспределения крутящих моментов между осями исследованы в гораздо меньшей степени.

Цель работы — повышение устойчивости и управляемости автомобилей с колесной формулой 4×4 и подключаемой передней осью путем перераспределения крутящих моментов между осями.

Математическая модель трансмиссии автомобиля с колесной формулой 4×4 и подключаемой передней осью. Рассмотрим схему транс-

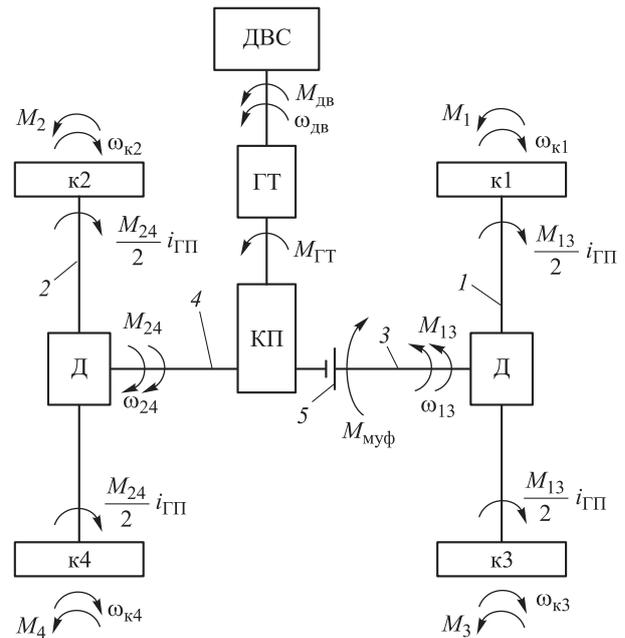


Рис. 1. Схема трансмиссии колесной машины (4×4) с передней подключаемой осью:

- 1 и 2 — передняя и задняя оси; 3 и 4 — приводные валы от коробки передач к передней и задней осям;
5 — фрикционная муфта подключения привода оси;
ДВС — двигатель внутреннего сгорания;
ГТ — гидротрансформатор; КП — коробка передач;
Д — симметричный межколесный дифференциал;
к1...к4 — номера колес

миссии колесной машины (4×4) с передней подключаемой осью, приведенную на рис. 1. Здесь введены следующие обозначения: M_1 – M_4 — моменты сопротивления качению на колесах; $M_{дв}$ — крутящий момент на коленчатом валу двигателя; $\omega_{дв}$ — угловая скорость вращения коленчатого вала двигателя; $M_{ГТ}$ — крутящий момент на валу турбинного колеса гидротрансформатора; M_{13} и M_{24} — крутящие моменты на третьем и четвертом валах; ω_{13} и ω_{24} — угловые скорости вращения третьего и четвертого валов; $M_{муф}$ — крутящий момент, развиваемый фрикционной муфтой.

Работа трансмиссии может быть описана следующей системой уравнений:

$$J_k \dot{\omega}_{к1} = \frac{M_{13} i_{ГП}}{2} - M_1;$$

$$J_k \dot{\omega}_{к2} = \frac{M_{24} i_{ГП}}{2} - M_2;$$

$$J_k \dot{\omega}_{к3} = \frac{M_{13} i_{ГП}}{2} - M_3;$$

$$J_k \dot{\omega}_{к4} = \frac{M_{24} i_{ГП}}{2} - M_4;$$

$$J_{13}\dot{\omega}_{13} = M_{\text{муф}} - M_{13};$$

$$J_{24}\dot{\omega}_{24} = M_{\text{ГП}}i_{\text{КП}} - M_{\text{муф}} - M_{24};$$

$$\frac{\dot{\omega}_{\text{к1}} + \dot{\omega}_{\text{к3}}}{2} i_{\text{ГП}} = \dot{\omega}_{13};$$

$$\frac{\dot{\omega}_{\text{к2}} + \dot{\omega}_{\text{к4}}}{2} i_{\text{ГП}} = \dot{\omega}_{24},$$

где $J_{\text{к}}$ — момент инерции колеса; $i_{\text{ГП}}$ — передаточное отношение главной передачи (ГП); J_{13} — момент инерции вала трансмиссии от КП до ГП переднего моста; J_{24} — момент инерции вала трансмиссии от КП до ГП заднего моста; $i_{\text{КП}}$ — передаточное отношение КП.

Для моделирования совместной работы двигателя и гидротрансформатора использована математическая модель, представленная в работе [7].

Математическая модель фрикционной муфты привода подключаемой оси. Крутящий момент $M_{\text{муф}}$ определяется по формуле [8]

$$M_{\text{муф}} = F_{\text{тр}}r_{\text{эф}},$$

где $F_{\text{тр}}$ — сила трения между дисками муфты; $r_{\text{эф}}$ — эффективный радиус трения.

Сила трения $F_{\text{тр}}$ приближенно определяется по следующему алгоритму [9]. Если $|\omega_{13} - \omega_{24}| \geq \Delta\omega_n$ ($\Delta\omega_n$ — пороговое значение), то

$$F_{\text{тр}} = F_c \left[1 + (k_b - 1)e^{-c_w|\omega_{13} - \omega_{24}|} \right] \text{sign}(\omega_{13} - \omega_{24});$$

$$F_c = F_{pr} + f_{cfr} \frac{N}{\pi r_{\text{эф}}^2}; \quad F_{pr} = \mu N,$$

где F_c — сила кулоновского трения; k_b — коэффициент изменения силы страгивания; c_w — коэффициент перевода; F_{pr} — сила трения покоя; f_{cfr} — коэффициент силы кулоновского трения; N — нормальная реакция в контакте; μ — коэффициент трения покоя.

Если $|\omega_{13} - \omega_{24}| < \Delta\omega_n$, то

$$F_{\text{тр}} = K_x (\omega_{13} - \omega_{24}),$$

где K_x — коэффициент пропорциональности,

$$K_x = \frac{F_c \left[1 + (k_b - 1)e^{-c_w|\omega_{13} - \omega_{24}|} \right]}{\Delta\omega_n}.$$

Значения параметров, принятых при моделировании

| | |
|--|---------|
| Коэффициент силы кулоновского трения f_{cfr} , м ² | 0,00033 |
| Коэффициент изменения силы страгивания k_b | 1,1 |
| Коэффициент перевода c_w , с | 1,24 |
| Максимальный крутящий момент, передаваемый фрикционной муфтой, Н·м | 2 250 |
| Пороговое значение разности угловых скоростей $\Delta\omega_n$, с ⁻¹ | 0,3 |
| Коэффициент трения покоя μ | 0,2 |

Алгоритм перераспределения крутящих моментов между ведущей и подключаемой осями автомобиля. Одной из основных проблем, возникающих при стабилизации движения автомобиля, является определение параметров его движения (в первую очередь линейной скорости центра масс (ЦМ)), на основании которых выявляется опасность наступления тех или иных нештатных ситуаций (занос передней или задней оси, опрокидывание) и принимается решение на формирование управляющего стабилизирующего воздействия.

За управляющий параметр примем величину $h = [0...1]$ — долю от максимального передаваемого фрикционной муфтой крутящего момента. Запишем выражение для пропорционально-дифференциального регулятора: если $\beta < 0$ (занос задней оси) и продольное ускорение ЦМ автомобиля $j_x > 0$, то $h = c_1|\beta| + c_2\dot{\beta}$, где c_1 и c_2 — коэффициенты усиления регулятора. Во всех остальных случаях $h = 0$.

Исследование работоспособности предложенного алгоритма методами имитационного моделирования. Для подтверждения работоспособности алгоритма перераспределения крутящих моментов между задней ведущей и передней подключаемой осями автомобиля проведены теоретические исследования с помощью имитационного математического моделирования. Особенности математической модели движения рассмотрены в работе [10].

Представлены результаты численного моделирования движения автомобиля с колесной формулой 4×4 и передней подключаемой осью полной массой 6 000 кг. Исследовано движение на опорном основании «лед со снегом» (с коэффициентом взаимодействия движителя с опорным основанием при полном буксовании $\mu_{s, \text{max}} = 0,35$). Отметим, что под термином «опорное

основание» понимается только твердая недеформируемая опорная поверхность. Передние колеса автомобиля — управляемые, начальная скорость $v = 30$ км/ч. Движение изучали при по-

стоянном уровне воздействия на педаль акселератора, угол поворота рулевого колеса изменялся от нуля до заданного значения в течение первой секунды и далее оставался неизменным.

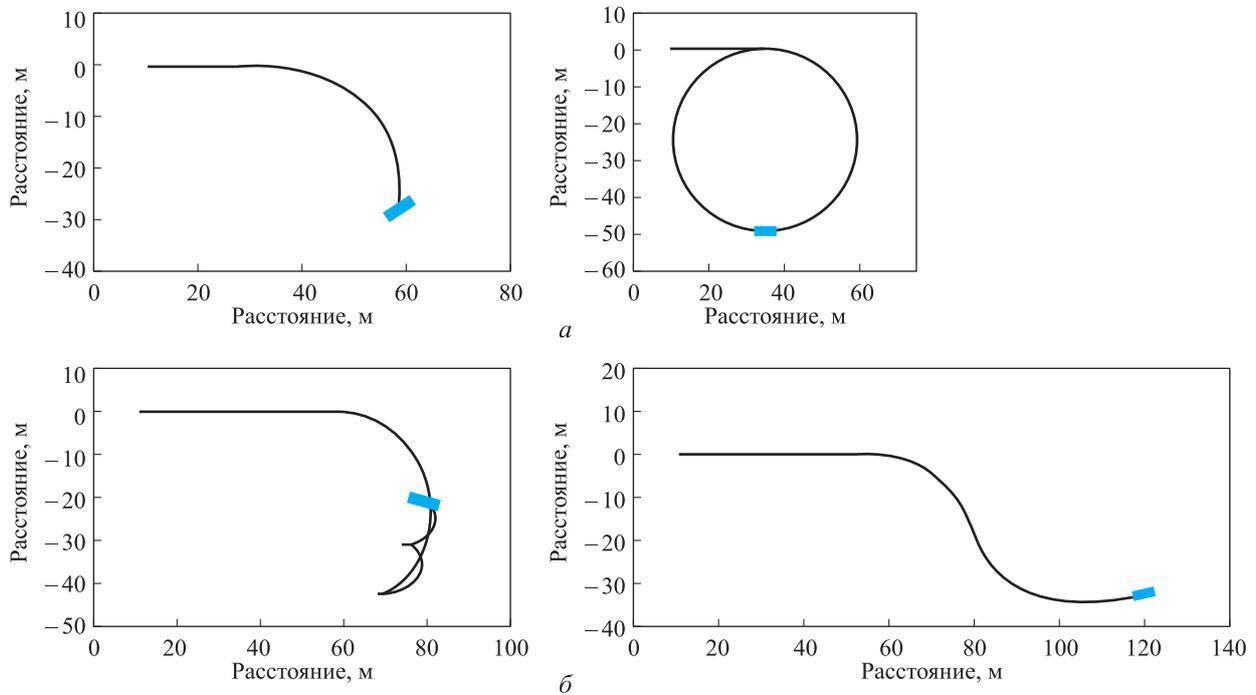


Рис. 2. Траектории движения заднеприводного автомобиля (слева) и колесной машины (4×4) с подключаемой передней осью (справа) при совершении маневров с разгоном на опорном основании «лед со снегом»:

a — «поворот»; $б$ — «переставка»

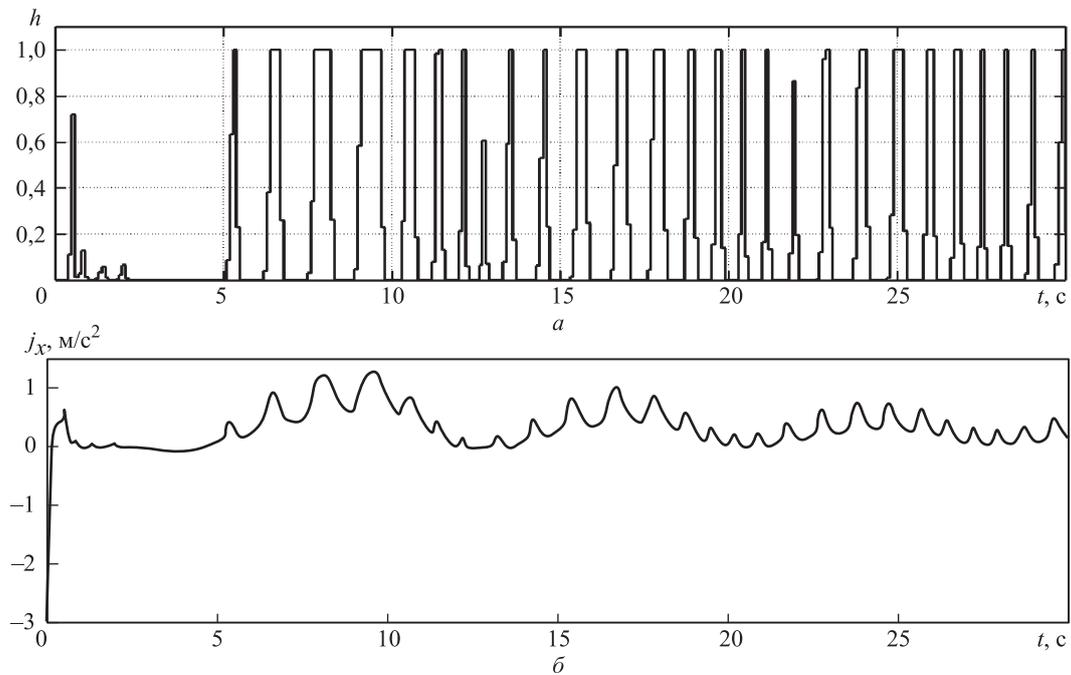


Рис. 3 (начало). Изменение во времени t управляющего параметра h (a , $в$) и продольного ускорения j_x ЦМ автомобиля с подключаемой передней осью ($б$, $г$) при совершении маневров с разгоном на опорном основании «лед со снегом»:

a , $б$ — «поворот»

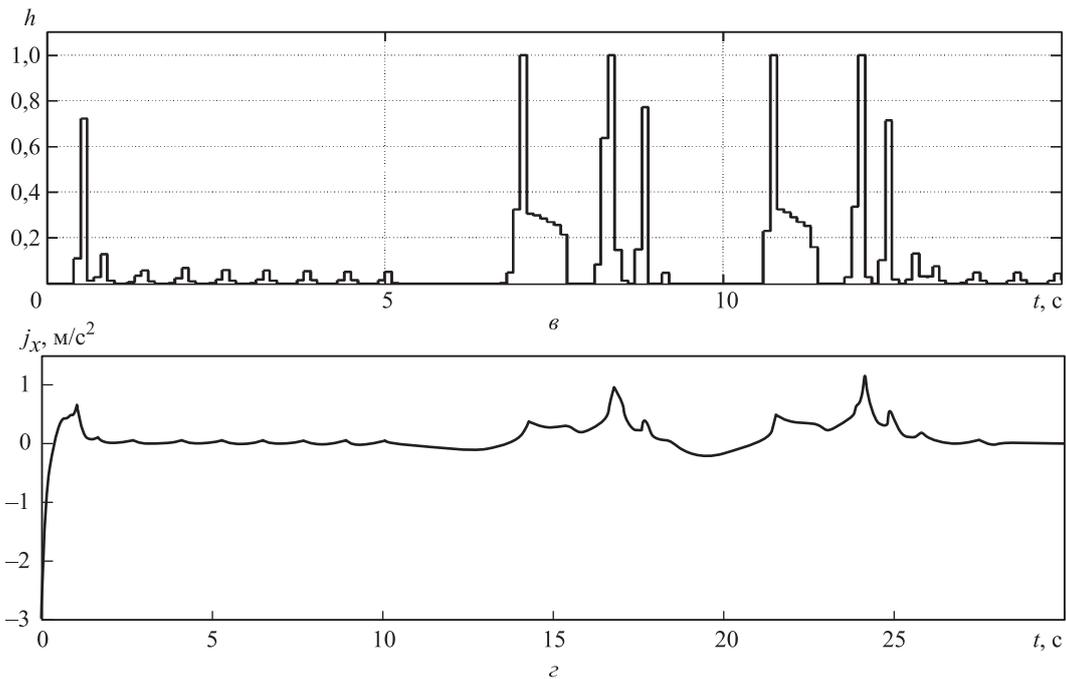


Рис. 3 (окончание). Изменение во времени t управляющего параметра h (а, в) и продольного ускорения j_x ЦМ автомобиля с подключаемой передней осью (б, г) при совершении маневров с разгоном на опорном основании «лед со снегом»: в, г — «переставка»

Моделировали два типа маневров:

- вход в поворот и движение в повороте с фиксированным радиусом;
- изменение полосы движения (переставка).

Траектории движения заднеприводного автомобиля при совершении маневров с разгоном

на опорном основании «лед со снегом» приведены на рис. 2, слева, а траектории движения колесной машины (4×4) с подключаемой передней осью в тех же режимах — на рис. 2, справа.

Анализ траекторий движения автомобиля только с задней приводной осью (см. рис. 2,

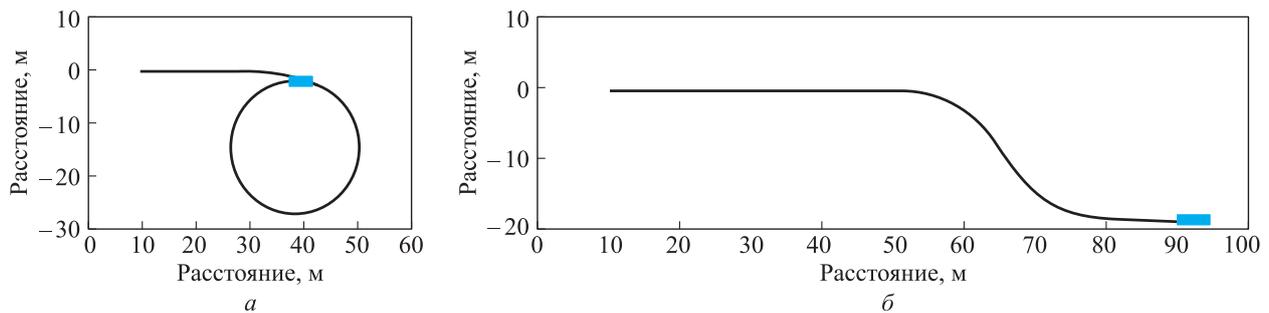


Рис. 4. Траектории движения автомобиля с подключаемой передней осью при совершении им маневров с замедлением на опорном основании «лед со снегом»: а — «поворот»; б — «переставка»

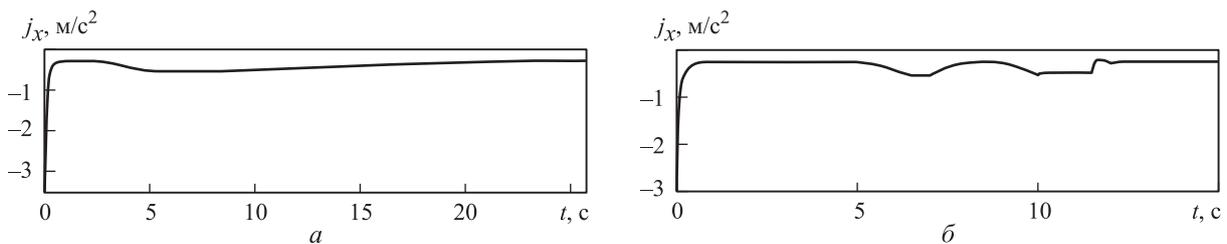


Рис. 5. Изменение во времени t продольного ускорения j_x ЦМ автомобиля с подключаемой передней осью при совершении им маневров с замедлением на опорном основании «лед со снегом»:

слева) свидетельствует о том, что при совершении маневров на опорной поверхности «лед со снегом» он теряет устойчивость (развивается занос задней оси). При тех же условиях движения колесная машина с подключаемой передней осью (см. рис. 2, справа) сохраняет устойчивость, небольшие отклонения от траектории можно компенсировать подруливанием.

На рис. 3 показано изменение во времени управляющего параметра h и продольного ускорения ЦМ автомобиля с подключаемой передней осью при совершении им маневров с разгоном на опорном основании «лед со снегом».

Представляет также интерес случай, когда машина совершает маневры с замедлением ($j_x < 0$). Согласно предложенному алгоритму, в этом случае перераспределения крутящих моментов между ведущими осями $h = 0$. На рис. 4 показаны траектории движения автомобиля

с подключаемой передней осью при совершении им маневров с замедлением, а на рис. 5 — изменение во времени продольного ускорения ЦМ этой машины.

Из рис. 4 и 5 следует, что при маневрировании с замедлением заднеприводная машина устойчива и перераспределение крутящего момента между осями не требуется.

Выводы

1. Предложен метод повышения устойчивости и управляемости автомобилей с колесной формулой 4×4 и подключаемой передней осью путем перераспределения крутящих моментов между осями.

2. Имитационным моделированием движения таких двухосных автомобилей доказаны эффективность и работоспособность разработанного метода.

Литература

- [1] Hattori Y., Koibuchi K., Yokoyama T. Force and moment control with nonlinear optimum distribution for vehicle dynamics. *6th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, Hiroshima, Japan, 2002, pp. 595–600.
- [2] Morselli R., Zanasi R., Sandoni G. Mechanical and Active Car Differentials: Detailed and Reduced Dynamic Models. *The 4th International Conference on Mathematical Modelling (Mathmod)*, Vienna, February 5–7, 2003, pp. 1011–1020.
- [3] Mammar S., Baghdassarian V.B. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering. *Proceedings of the American Control Conference*, 2000, vol. 1, pp. 105–109.
- [4] Rodrigues A.O. *Evaluation of an active steering system. Master's degree project*. Sweden, 2004. URL: http://people.kth.se/~kallej/grad_students/rodriguez_orozco_thesis04.pdf (дата обращения 1 октября 2017).
- [5] Mokhiamar O., Abe M. Active wheel steering and yaw moment control combination to maximize stability as well as vehicle responsiveness during quick lane change for active vehicle handling safety. *Journal of Automobile Engineering*, 2002, vol. 216(2), pp. 115–124.
- [6] Жилейкин М.М., Чулюкин А.О. Алгоритм работы системы динамической стабилизации для автомобиля 4×4 с подключаемой задней осью. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 4. URL: <http://technomagelpub.elpub.ru/jour/article/view/570>, doi: 10.7463/0414.0704685 (дата обращения 20 октября 2017).
- [7] Вахламов В.К. *Автомобили: эксплуатационные свойства*. Москва, Издательский центр «Академия», 2006. 240 с.
- [8] Полунгян А.А., ред. *Проектирование полноприводных колесных машин*. В 3 т. Т. 2. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 432 с.
- [9] Чичинадзе А.В., ред. *Основы трибологии (трение, износ, смазка)*. Москва, Центр «Наука и техника», 1995. 778 с.
- [10] Жилейкин М.М. *Теоретические основы повышения показателей устойчивости и управляемости колесных машин на базе методов нечеткой логики*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 238 с.

References

- [1] Hattori Y., Koibuchi K., Yokoyama T. Force and moment control with nonlinear optimum distribution for vehicle dynamics. *6th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, Hiroshima, Japan, 2002, pp. 595–600.
- [2] Morselli R., Zanasi R., Sandoni G. Mechanical and Active Car Differentials: Detailed and Reduced Dynamic Models. *4th Mathmod*, Vienna, February 5–7, 2003, pp. 1011–1020.
- [3] Mammar S., Baghdassarian V.B. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering. *Proceedings of the American Control Conference*, 2000, vol. 1, pp. 105–109.
- [4] Rodrigues A.O. *Evaluation of an active steering system. Master's degree project*. Sweden, 2004. Available at: http://people.kth.se/~kallej/grad_students/rodriguez_orozco_thesis04.pdf (accessed 1 October 2017).
- [5] Mokhiamar O., Abe M. Active wheel steering and yaw moment control combination to maximize stability as well as vehicle responsiveness during quick lane change for active vehicle handling safety. *Journal of Automobile Engineering*, 2002, vol. 216(2), pp. 115–124.
- [6] Zhileikin M.M., Chuliukin A.O. Algoritm raboty sistemy dinamicheskoi stabilizatsii dlia avtomobilia 4×4 s podkliuchaemoi zadnei os'iu [Algorithm of Dynamic Stabilization System for a Car 4 ×4 with a Link Rear Axle]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2014, no. 4. Available at: <http://technomagelpub.elpub.ru/jour/article/view/570> (accessed 20 October 2017), doi: 10.7463/0414.0704685.
- [7] Vakhlamov V.K. *Avtomobili: ekspluatatsionnye svoistva* [Cars: performance properties]. Moscow, Publishing center «Akademii», 2006. 240 p.
- [8] *Proektirovanie polnoprivodnykh kolesnykh mashin* [Design of four-wheel drive wheeled vehicles]. Vol. 2. Ed. Polungian A.A. Moscow, Bauman Press, 2008. 432 p.
- [9] *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka)* [Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication)]. Ed. Chichinadze A.V. Moscow, Nauka i tekhnika publ., 1995. 778 p.
- [10] Zhileikin M.M. *Teoreticheskie osnovy povysheniia pokazatelei ustoychivosti i upravliaemosti kolesnykh mashin na baze metodov nechetkoi logiki* [Theoretical bases of increase of indicators of stability and controllability of the wheeled vehicle based on fuzzy logic]. Moscow, Bauman Press, 2016. 238 p.

Статья поступила в редакцию 21.11.2017

Информация об авторах

ЖИЛЕЙКИН Михаил Михайлович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: jileykin_m@mail.ru).

ЭРАНОСЯН Артем Ванович (Москва) — инженер НИИ «Специального машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: artem_bmstu@mail.ru).

Information about the authors

ZHILEYKIN Mikhail Mikhailovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Wheeled Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: jileykin_m@mail.ru).

ERANOSYAN Artem Vanovich (Moscow) — Engineer, Research Institute of Special Machinery. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: artem_bmstu@mail.ru).