

УДК 629.33

DOI 10.18698/0536-1044-2016-5-23-29

Разработка принципов повышения устойчивости автопоездов при экстренном торможении на прямолинейном участке и отказе тормозной системы прицепного звена

Г.Г. Анкинович¹, А.Н. Вержбицкий¹, М.М. Жилейкин¹, Г.И. Скотников²

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

² ООО «Наземные Транспортные Системы», 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

The Development of Principles to Improve Stability of Road Trains during Emergency Braking on a Straight Section of the Road and in the Event of Brake Failure in Trailers

G.G. Ankinovich¹, A.N. Verzhbitskiy¹, M.M. Zhileykin¹, G.I. Skotnikov²

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

² ООО Ground Transportation Systems, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: ank-gg42@yandex.ru, aver@bmstu.ru, jileykin_m@mail.ru, skotnikov.g@yandex.ru



Широкое распространение многозвенных транспортных средств (МТС) — автопоездов с прицепами и полуприцепами — в структуре перевозок обусловлено потребностью в транспортировании тяжелых крупногабаритных грузов и необходимостью обеспечения малых удельных давлений на опорную поверхность при повышении грузоподъемности и эксплуатационных скоростей движения транспортных средств. Важными свойствами МТС являются устойчивость и управляемость, поскольку с ростом скорости движения они в значительной мере определяют безопасность эксплуатации подвижного состава. Повышение безопасности движения МТС тем более актуально, что дорожно-транспортные происшествия (ДТП) с их участием приводят к наиболее тяжелым последствиям и огромному материальному ущербу. Разработан метод повышения устойчивости автопоездов при экстренном торможении на прямолинейном участке и отказе тормозной системы прицепного звена, позволяющий сохранить траекторную устойчивость МТС и избежать ДТП с тяжелыми последствиями. С помощью имитационного моделирования доказана эффективность предложенного метода повышения устойчивости автопоездов при экстренном торможении на прямолинейном участке и отказе тормозной системы прицепного звена.

Ключевые слова: автопоезд, многозвенное транспортное средство, устойчивость, управляемость, система динамической стабилизации.



The widespread use of multi-combination vehicles (MCVs) such as road trains with trailers and semi-trailers in the cargo delivery system is due to the need to transport heavy bulky cargo and ensure low unit pressure on the supporting surface when MCV carrying capacity and operational speed increase. Stability and controllability are important properties of the vehicles as they largely determine the operational safety when the speed increases.

Improving the operational safety is especially important because traffic accidents involving MCVs lead to the most severe consequences and significant material damage. The authors have developed a method for improving road train stability in the event of emergency braking on a straight section of the road and failure of the trailer braking system. The method makes it possible to maintain the trajectory stability of the road train and avoid accidents with heavy consequences. The efficiency and effectiveness of the proposed method of improving road train stability in the event of emergency braking on a straight section of the road and failure of the trailer braking system is proved by simulation modelling.

Keywords: road train, multi combination vehicle, stability, controllability, dynamic stability.

Широкое распространение многозвенных транспортных средств (МТС) — автопоездов с прицепами и полуприцепами — в структуре перевозок обусловлено потребностью в транспортировании тяжелых крупногабаритных грузов и необходимостью обеспечения малых удельных давлений на опорную поверхность при повышении грузоподъемности и эксплуатационных скоростей движения МТС [1].

Эффективность использования подвижного состава автомобильного транспорта зависит от совокупности его свойств, которые проявляются в процессе эксплуатации и обуславливают пригодность этих транспортных средств к применению в заданных эксплуатационных условиях. Важными свойствами МТС являются устойчивость и управляемость, поскольку с ростом скорости движения они в значительной степени определяют безопасность эксплуатации подвижного состава. Повышение безопасности движения МТС тем более актуально, что дорожно-транспортные происшествия (ДТП) с участием МТС приводят к наиболее тяжелым последствиям и огромному материальному ущербу.

Самыми распространенными причинами возникновения ДТП с участием МТС являются:

- боковое опрокидывание прицепа или полуприцепа при совершении поворота со скоростью, превышающей критическую;
- потеря устойчивости при экстренном торможении, особенно в случае отказа тормозной системы прицепного звена автопоезда.

Вопросам обеспечения маневренности, управляемости и устойчивости при проектировании МТС посвящены работы советских и российских ученых [1, 2]. Однако в этих работах не рассмотрены вопросы создания систем динамической стабилизации (СДС) движения прицепов и полуприцепов в составе автопоезда.

Работы зарубежных авторов в основном посвящены разработке алгоритмов работы СДС отдельно движущихся автомобилей либо методами создания стабилизирующих моментов подтормаживанием отдельных колес [3–5], либо путем подруливания [6–8]. Вопросы стабилизации движения прицепов и полуприцепов в составе автопоезда, как правило, решают повышением устойчивости против опрокидывания при криволинейном движении [9] и оснащением автопоездов антиблокировочными системами тормозов.

Цель работы — разработка принципов повышения устойчивости движения МТС при экстренном торможении на прямолинейном участке и отказе тормозной системы прицепного звена.

Описание объекта исследования и условий имитационных испытаний. Рассмотрим движение автопоезда, состоящего из автомобиля-тягача, имеющего следующие варианты исполнения:

- колесная формула 6×4 с односкатными шинами;
- колесная формула 6×4 с двускатными шинами;
- колесная формула 4×2 с двускатными шинами.

Прицепные звенья автопоезда рассмотрим в следующих вариантах исполнения:

- 1) двухосный полуприцеп с односкатными шинами;
- 2) двухосный прицеп с передней поворотной осью и односкатными шинами;
- 3) два двухосных прицепа по п. 2 с передней поворотной осью и односкатными шинами.

Технические характеристики тягачей, полуприцепа и прицепа приведены далее (ССУ — седельно-сцепное устройство, ЦМ — центр масс).

Технические характеристики тягачей с колесной формулой

| | 4×2 | 6×4 |
|--------------------------------------|--------|--------|
| Формула рулевого управления. | 1-0 | 1-0-0 |
| Расстояние, м: | | |
| от ЦМ до первой оси | 2,1285 | 2,1285 |
| от ЦМ до второй оси | 2,1285 | 2,327 |
| от ЦМ до третьей оси | - | 2,427 |
| Колея, м: | | |
| передних колес | 2,04 | 2,04 |
| задних колес | 2,60 | 2,60 |
| Колесная база, м | 4,254 | 4,556 |
| Радиус колеса, м | 0,5 | 0,5 |
| Высота ССУ, м | 1,5 | 1,5 |
| Нагрузка на ССУ, кг | 11 000 | 11 000 |
| Полная масса тягача, кг | 10 720 | 12 100 |

Технические характеристики полуприцепа прицепа

| | полуприцепа | прицепа |
|------------------------------------|-------------|---------|
| Расстояние, м: | | |
| от ССУ до 1-й оси | 9,2 | - |
| от ССУ до 2-й оси | 10,5 | - |
| от ССУ до центра тяжести | 5,0 | - |
| Колея, м | 2,04 | 2,04 |
| Радиус колеса, м | 0,5 | 0,5 |
| Масса полная, кг | 25 480 | 6 430 |

У автопоездов с колесной формулой 4×2 введено смещение вертикальной оси складывания седельно-сцепного устройства вправо на 0,03 м по отношению к продольной оси симметрии тягача, а для автопоездов с колесной формулой 6×4 — смещение на 0,05 м. Тормозные системы тягача и полуприцепа оснащены антиблокировочной системой, препятствующей блокированию колес при торможении.

В целях подтверждения эффективности алгоритмов работы СДС автопоезда проведем теоретические исследования с помощью имитационного математического моделирования движения автопоезда. Особенности математической модели движения МТС рассмотрены в работе [10]. Программное обеспечение реализовано в программном комплексе MATLAB/SIMULINK/SIMMECHANICS.

Исследовалось движение на опорном основании «сухой асфальт» (с коэффициентом взаимодействия движителя с опорным основанием при полном буксовании $\mu_{s\max} = 0,7$). Следует отметить, что под термином «опорное основание» понимают только твердую недеформируемую опорную поверхность. Передние колеса тягача — управляемые.

Проводилось моделирование экстренного торможения при прямолинейном движении с начальной скоростью 90 км/ч. При этом в мо-

дель вводился отказ тормозной системы прицепного звена путем снижения тормозного момента на колесе на 85 %.

Информационное поле СДС. При разработке системы управления курсовой и траекторной стабилизации движения автопоезда в процессе управления необходимо определять параметры, которые достаточно надежно характеризуют свойство поворачиваемости в текущий момент времени.

Для тягача такими параметрами являются: угловая скорость ω_k вращения колес машины, продольное j_x и боковое j_y ускорения ее центра масс, а также разность углов увода крайних осей ($\delta_n - \delta_1$), которую невозможно измерить в процессе движения.

В качестве параметра, характеризующего степень поворачиваемости тягача, использовался угол $\beta = \theta_t - \theta_\phi \neq 0$ между векторами теоретической V_t и фактической V_ϕ линейных скоростей центра масс (рис. 1).

Составляющие вектора фактической скорости машины V_x и V_y определены в работе [11].

Несовпадение углов направлений теоретического и фактического векторов скорости озна-

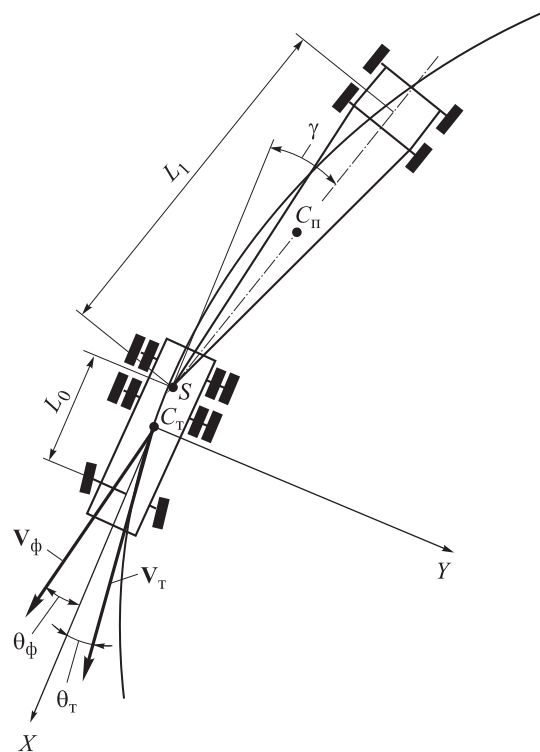


Рис. 1. Угол отклонения вектора теоретической скорости центра масс тягача от продольной оси: C_t и C_p — центры масс тягача и полуприцепа; S — седельно-сцепное устройство

чает, что на тягач действует динамический возмущающий момент $M_{\text{возм}}$, стремящийся «увести» машину с заданной водителем траектории движения. Для компенсации этого возмущающего воздействия необходимо создать динамический стабилизирующий момент $M_{\text{д.с.}}$, который не позволит машине изменить траекторию.

Исследование движения автопоезда, не оснащенного СДС. На рис. 2 для автопоездов различной конфигурации, не оснащенных СДС, показано конечное положение автопоезда после окончания торможения на прямолинейном участке.

Из рис. 2, а–в следует, что при экстренном торможении на прямолинейном участке в случае аварийного отказа тормозной системы полуприцепа наибольшей устойчивостью обладает автопоезд с тягачом (6×4), оснащенный двускатными ведущими колесами, у него наименьшее

отклонение от заданной траектории. Тягач (4×2) с двускатными ведущими колесами и тягач (6×4) с односкатными ведущими колесами имеют существенные отклонения от заданной траектории и углы складывания полуприцепа, достигающие соответственно 70 и 90°.

Из рис. 2, г, д следует, что при экстренном торможении на прямолинейном участке в случае аварийного отказа тормозной системы прицепа автопоезда имеют существенные отклонения от заданной траектории, угол складывания прицепа достигает 50°.

Во всех рассмотренных случаях тягач выталкивается прицепными звеньями на соседнюю полосу движения, что может привести к ДТП с тяжелыми последствиями.

Разработка принципов стабилизации движения МТС в аварийных ситуациях. В случае экстренного торможения при отказе тормозной

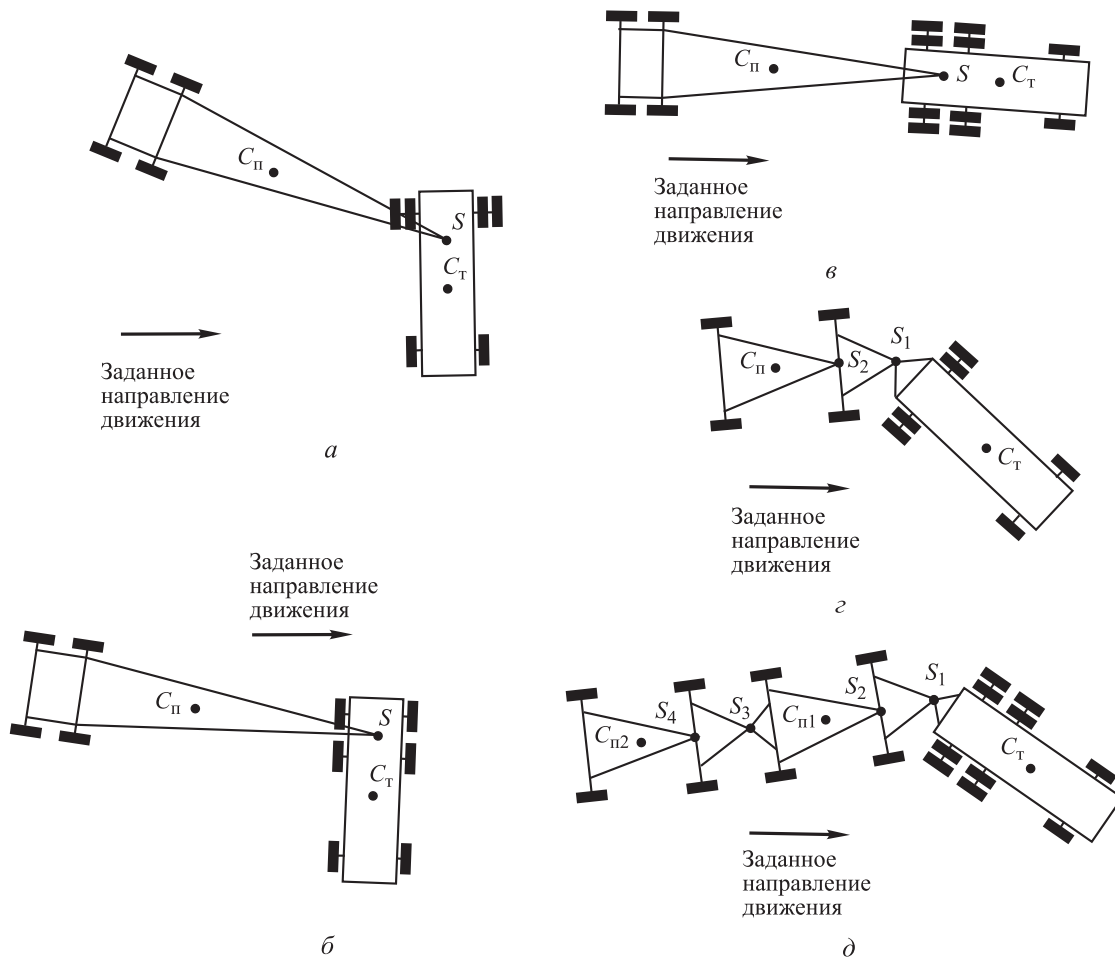


Рис. 2. Конечное положение автопоезда, не оснащенного СДС, после окончания торможения на прямолинейном участке:

- а — тягач (4×2) с двускатными ведущими колесами и полуприцепом; б — тягач (6×4) с односкатными ведущими колесами и полуприцепом; в — тягач (6×4) с двускатными ведущими колесами и полуприцепом; г — тягач (4×2) с одним прицепом; д — тягач (6×4) с двумя прицепами

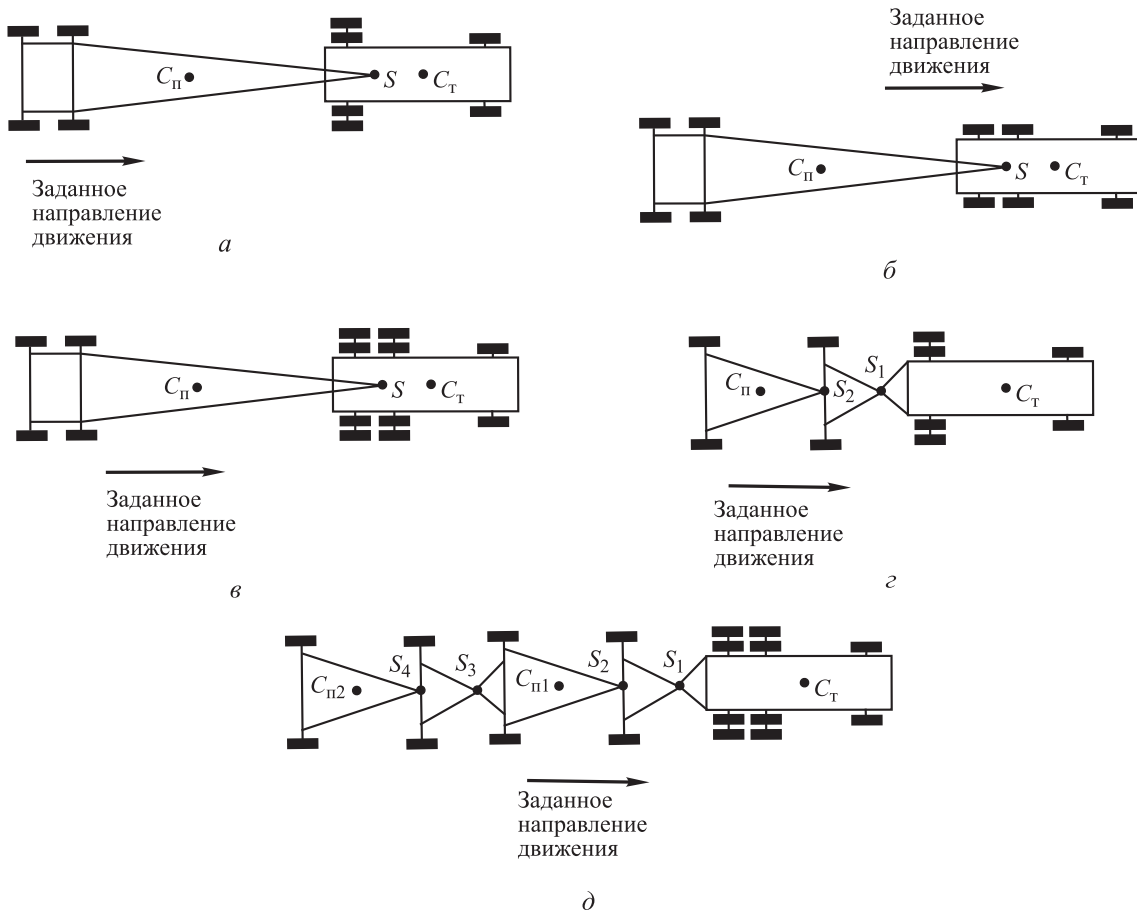


Рис. 3. Конечное положение автопоезда, оснащенного СДС, после окончания торможения на прямолинейном участке:
 а — тягач (4×2) с двускатными ведущими колесами и полуприцепом; б — тягач (6×4) с односкатными ведущими колесами и полуприцепом;
 в — тягач (6×4) с двускатными ведущими колесами и полуприцепом;
 г — тягач (4×2) с одним прицепом; д — тягач (6×4) с двумя прицепами

системы полуприцепа характерным случаем потери устойчивости автопоездом является отклонение тягача от заданной траектории за счет того, что более тяжелый полуприцеп выталкивает тягач на соседнюю полосу движения. Торможение приводит к перераспределению нормальных реакций между осями тягача, и передние колеса нагружаются дополнительной вертикальной силой. Это обстоятельство, а также работа антиблокировочной системы тормозов, препятствующей блокированию колес тормозным моментом, приводит к повышению сцепления колес с опорным основанием. Все это позволяет применить корректирующее изменение углов поворота управляемых колес (подруливание), которое будет способствовать удержанию тягача на заданной водителем траектории.

Как показано в работе [12], для обеспечения устойчивого движения колесной машины за

счет корректирующего изменения угла поворота управляемых колес угол подруливания должен быть больше разности ($\delta_2 - \delta_1$). Средний угол подруливания для управляемых колес передней оси $\theta_{1cp}^{подр} = \beta$. Тогда углы подруливания внешнего и внутреннего (по отношению к направлению поворота) управляемых колес определяют по следующим формулам:

$$\theta_{внутр}^{подр} = \frac{L}{L/\beta - B/2};$$

$$\theta_{внеш}^{подр} = \frac{L}{L/\beta + B/2},$$

где L, B — соответственно база и колея колесной машины.

Исследование движения автопоезда, оснащенного СДС. На рис. 3 для автопоездов раз-

личной конфигурации, не оснащенных СДС, показано конечное положение автопоезда после окончания торможения на прямолинейном участке.

Результаты моделирования показали, что при экстренном торможении на прямолинейном участке в случае аварийного отказа тормозной системы прицепного звена для всех исследованных автопоездов разработанные методы стабилизации движения являются эффективными. Ни в одном из случаев транспортное средство не покидало своей полосы движения, угол складывания автопоезда снизился на 90...99 %.

Выводы

1. Разработан метод повышения устойчивости автопоездов при экстренном торможении на прямолинейном участке и отказе тормозной системы прицепного звена, позволяющий сохранить траекторную устойчивость автопоезда и избежать ДТП с тяжелыми последствиями.

2. С помощью имитационного моделирования доказана эффективность предложенного метода повышения устойчивости автопоездов при экстренном торможении на прямолинейном участке и отказе тормозной системы прицепного звена.

Литература

- [1] Гладов Г.И., Петренко А.М. *Специальные транспортные средства: Теория*. Москва, Академкнига, 2006. 215 с.
- [2] Закин Я.Х. *Маневренность автомобиля и автопоезда*. Москва, Транспорт, 1986. 136 с.
- [3] Kaoru S., Yoshiaki S. Application of active yaw control to vehicle dynamics by utilizing driving/braking force. *JSAE Rev*, 1999, vol. 20 (2), pp. 289–295.
- [4] Tseng H.E., Ashrafi B., Madau D., Allen Brown T., Recker D. The development of vehicle stability control at Ford. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1999, vol. 4 (3), pp. 223–234.
- [5] Sado H., Sakai S., Hori Y. Road condition estimation for traction control in electric vehicle. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1999, vol. 2, pp. 973–978.
- [6] Mammari S., Baghdassarian V.B. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering. *Proc. Amer. Contr. Conf.*, 2000, vol. 1, pp. 105–109.
- [7] Yoshimoto K., Tanaka H., Kawakami S. Proposal of driver assistance system for recovering vehicle stability from unstable states by automatic steering. *Int. Vehicle Electron Conf.*, 1999, pp. 514–519.
- [8] 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 2015).
- [9] Sampson D.J. *Active Roll Control of Articulated Heavy Vehicles*. Dissertation submitted to the University of Cambridge for the Degree of Doctor of Philosophy. United Kingdom, Cambridge University Engineering Department, 2000.
- [10] Горелов В.А. Математическое моделирование движения многозвенных колесных транспортных комплексов с учетом особенностей конструкций сцепных устройств. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, вып. 2. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/343394.html> (дата обращения 10 октября 2015).
- [11] Жилейкин М.М., Чулюкин А.О. Повышение устойчивости движения двухосных автомобилей за счет автоматической коррекции углов поворота управляемых колес (подруливания). *Промышленные АСУ и контроллеры*, 2015, № 1, с. 42–52.
- [12] Литвинов А.С. *Устойчивость и управляемость автомобиля*. Москва, Машиностроение, 1971. 416 с.

References

- [1] Gladov G.I., Petrenko A.M. *Spetsial'nye transportnye sredstva: Teoriia* [Special vehicles: Theory]. Moscow, Akademkniga publ., 2006. 215 p.
- [2] Zakin Ia.Kh. *Manevrennost' avtomobilia i avtopoezda* [The maneuverability of the car and train]. Moscow, Transport publ., 1986. 136 p.
- [3] Kaoru S., Yoshiaki S. Application of active yaw control to vehicle dynamics by utilizing driving/braking force. *JSAE Rev*, 1999, vol. 20 (2), pp. 289–295.

- [4] Tseng H.E., Ashrafi B., Madau D., Allen Brown T., Recker D. The development of vehicle stability control at Ford. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1999, vol. 4 (3), pp. 223–234.
- [5] Sado H., Sakai S., Hori Y. Road condition estimation for traction control in electric vehicle. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1999, vol. 2, pp. 973–978.
- [6] Mammar S., Baghdassarian V.B. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering. *Proc. Amer. Contr. Conf.*, 2000, vol. 1, pp. 105–109.
- [7] Yoshimoto K., Tanaka H., Kawakami S. Proposal of driver assistance system for recovering vehicle stability from unstable states by automatic steering. *Int. Vehicle Electron Conf.*, 1999, pp. 514–519.
- [8] 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 2015).
- [9] Sampson D.J. *Active Roll Control of Articulated Heavy Vehicles*. Dissertation submitted to the University of Cambridge for the Degree of Doctor of Philosophy. United Kingdom, Cambridge University Engineering Department, 2000.
- [10] Gorelov V.A. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniia mnogozvennykh kolesnykh transportnykh kompleksov s uchetom osobennosti konstruktsii stsepykh ustroystv [Mathematical motion simulation of multi-link wheeled transport complexes subject to coupling devices]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science & Education. BMSTU]. 2012, iss. 2. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/343394.html> (accessed 10 October 2015).
- [11] Zhileikin M.M., Chuliukin A.O. Povyshenie ustoichivosti dvizheniia dvukhosnykh avtomobilei za schet avtomaticheskoi korrektsii uglov povorota upravliaemykh koles (podrulivaniia) [The Increase of Stability of Motion of a Two-axle Cars with Automatic Correction Angle Steering Wheel]. *Promyshlennye ASU i kontrolyery* [Industrial Automatic Control Systems and Controllers]. 2015, no. 1, pp. 42–52.
- [12] Litvinov A.S. *Ustoichivost' i upravliaemost' avtomobilia* [Stability and control vehicle]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1971. 416 p.

Статья поступила в редакцию 17.11.2015

Информация об авторах

АНКИНОВИЧ Генрих Георгиевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ank-gg42@yandex.ru).

ВЕРЖБИЦКИЙ Александр Николаевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: aver@bmstu.ru).

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).

СКОТНИКОВ Глеб Игоревич (Москва) — инженер. ООО «Наземные Транспортные Системы» (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: skotnikov.g@yandex.ru).

Information about the authors

ANKINOVICH Genrikh Georgievich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Wheeled Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ank-gg42@yandex.ru).

VERZHBITSKIY Aleksandr Nikolaevich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Wheeled Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aver@bmstu.ru).

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

SKOTNIKOV Gleb Igorevich (Moscow) — Engineer. ООО Ground Transportation Systems (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: skotnikov.g@yandex.ru).