

Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 629.33

DOI 10.18698/0536-1044-2016-4-37-43

Разработка принципов повышения устойчивости автопоездов при экстренном торможении в повороте и аварийном отказе тормозной системы прицепных звеньев

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 when Turning and in the Event of Brake Failure in Trailers

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

¹ Bauman Moscow State Technical University, 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 увеличении грузоподъемности и эксплуатационных скоростей движения МТС. Устойчивость и управляемость — важные свойства транспортных средств и составляющие безопасности их движения. Повышение безопасности движения тем более актуально, что дорожно-транспортные происшествия (ДТП) с участием МТС приводят к наиболее тяжелым последствиям и огромному материальному ущербу. Разработан метод повышения устойчивости автопоездов при экстренном торможении в повороте и отказе тормозной системы прицепных звеньев, позволяющий сохранить траекторную устойчивость автопоезда и избежать ДТП с тяжелыми последствиями. Методами имитационного моделирования доказана работоспособность и эффективность предложенного метода повышения устойчивости автопоездов.

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 that determine their operational safety. 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 when turning 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 is proved by simulation modelling.

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

Широкое распространение многосвязных 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].

Устойчивость и управляемость являются важными свойствами МТС, поскольку с ростом скоростей движения они в значительной мере 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.

Одной из причин возникновения ДТП является потеря устойчивости при экстренном торможении в повороте, 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 них не рассматриваются вопросы создания систем динамической стабилизации (СДС) движения МТС.

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, решаются 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 в повороте и отказе тормозной системы прицепных звеньев.

Описание объекта исследования и условий имитационных испытаний. Рассмотрим движение автопоезда, оснащенного автомобилем-тягачом, имеющим следующие варианты исполнения:

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

Ниже приведены технические характеристики тягачей, где 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

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
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

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

Для подтверждения эффективности алгоритмов работы СДС транспортного средства проведем теоретическое исследование 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.

Исследуем движение на опорном основании «сухой асфальт» (с коэффициентом взаимодействия движителя с опорным основанием при полном буксовании $\mu_{Smax} = 0,7$). Следует отметить, что под термином «опорное основание» понимается только твердая недеформируемая опорная поверхность. Передние колеса тягача — управляемые.

Проводилось моделирование входа в поворот и движения в повороте с постоянным углом поворота управляемых колес и возрастающей курсовой скоростью движения (при этом скорость движения не превышает критической по опрокидыванию) и экстренное торможение. При этом у колес левого борта полуприцепа был реализован тормозной момент 0,7 от максимального значения, а у колес правого борта — 0,1 от максимального значения тормозного момента.

Информационное поле СДС. При разработке системы управления курсовой и траекторной стабилизации движения автопоезда в процессе управления необходимо определять параметры,

которые достаточно надежно характеризуют степень поворачиваемости в текущий момент времени.

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

В качестве параметра, характеризующего степень поворачиваемости тягача, предлагается использовать угол $\beta = \theta_T - \theta_\Phi \neq 0$ между векторами теоретической V_T и фактической V_Φ линейных скоростей центра масс (рис. 1).

Определение составляющих вектора фактической скорости машины V_x и V_y приведено в работе [11].

Несовпадение углов направлений теоретического и фактического векторов скорости означает, что на тягач действует динамический возмущающий момент $M_{возм}$, стремящийся «увести» машину с заданной водителем траектории движения. Для компенсации этого возмущающего воздействия необходимо создать динамический стабилизирующий момент $M_{д.с}$, который не позволит машине изменить траекторию.

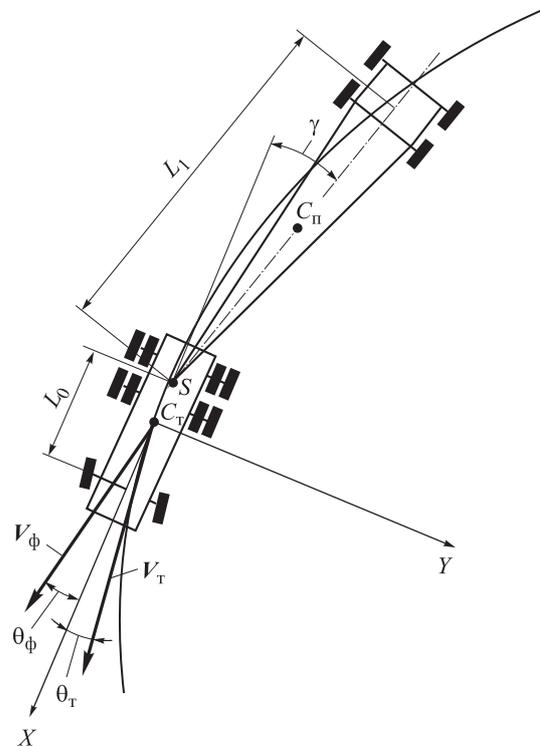


Рис. 1. Угол отклонения вектора теоретической скорости центра масс тягача от продольной оси: C_T — центр масс тягача; C_n — центр масс полуприцепа; S — седельно-цепное устройство

Обоснование принципов стабилизации движения МТС при экстренном торможении в повороте и аварийном отказе тормозной системы прицепных звеньев. При экстренном торможении в случае отказа тормозной системы прицепного звена характерной картиной потери автопоездом устойчивости является отклонение тягача от заданной траектории вследствие того, что более тяжелые прицепные звенья выталкивают тягач на соседнюю полосу движения. Для предотвращения аварийной ситуации применяют комплекс мероприятий.

Превентивно снижают скорость движения автопоезда в повороте, если она близка к критическим значениям, что достигается уменьшением потребляемой мощности двигателя и подтормаживанием колес прицепных звеньев. Описание такого алгоритма работы СДС приведено в работе [12].

Режим экстренного торможения приводит к перераспределению нормальных реакций между осями тягача, передние колеса нагружаются дополнительной вертикальной силой. Это обстоятельство, а также работа антиблокировочной системы тормозов, препятствующей блокированию колес тормозным моментом, приводит к повышению сцепных свойств этих колес с опорным основанием. Все это позволяет применить корректирующее изменение углов поворота управляемых колес (подруливание), которое будет способствовать удержанию тягача на заданной водителем траектории [11].

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

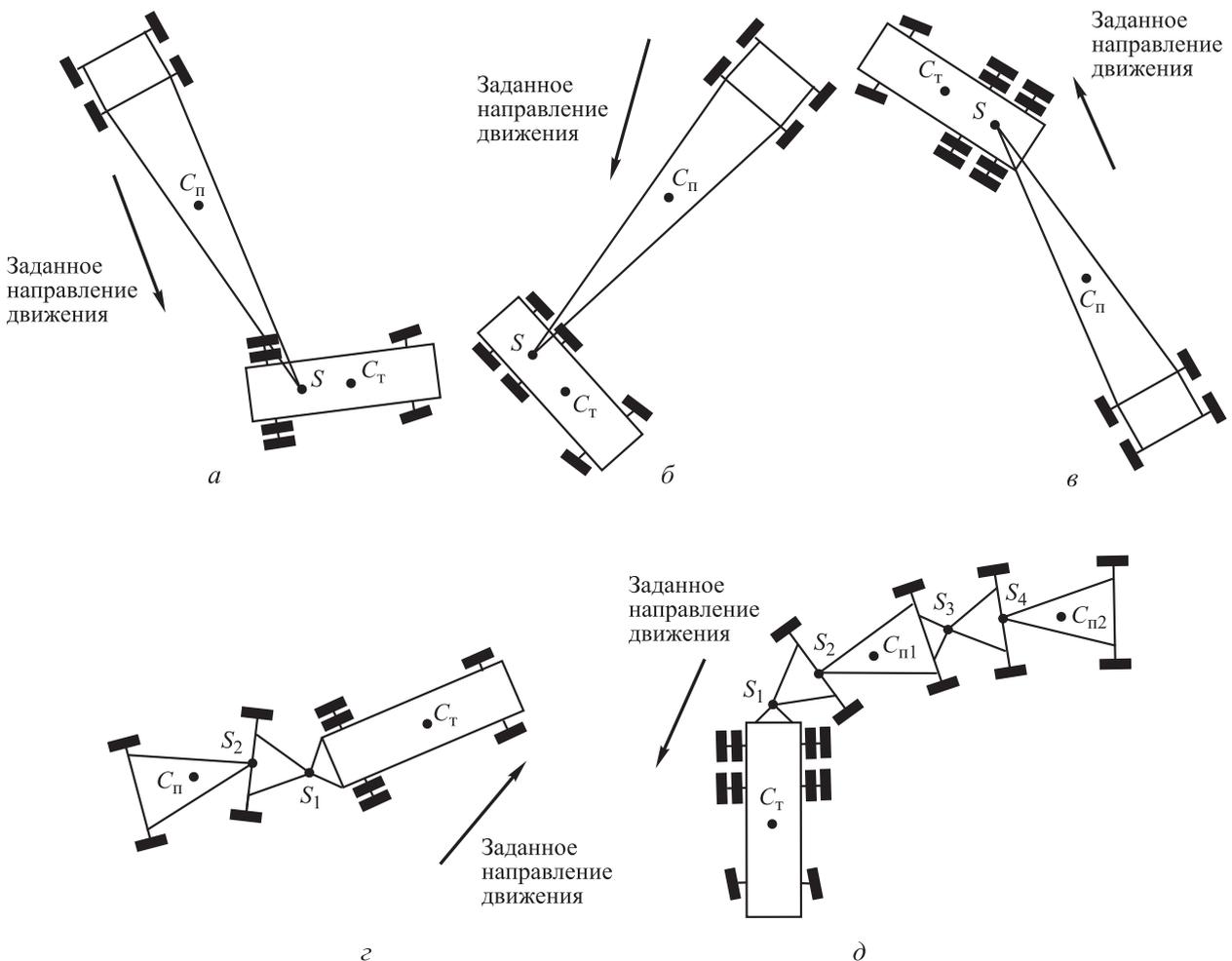


Рис. 2. Конечное положение автопоезда, не оснащенного СДС, после окончания торможения в повороте:
 а — тягач (4×2) с полуприцепом; б — тягач (6×4) с односкатными ведущими колесами и полуприцепом;
 в — тягач (6×4) с двухскатными ведущими колесами и полуприцепом; г — тягач (4×2) с одним прицепом;
 д —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

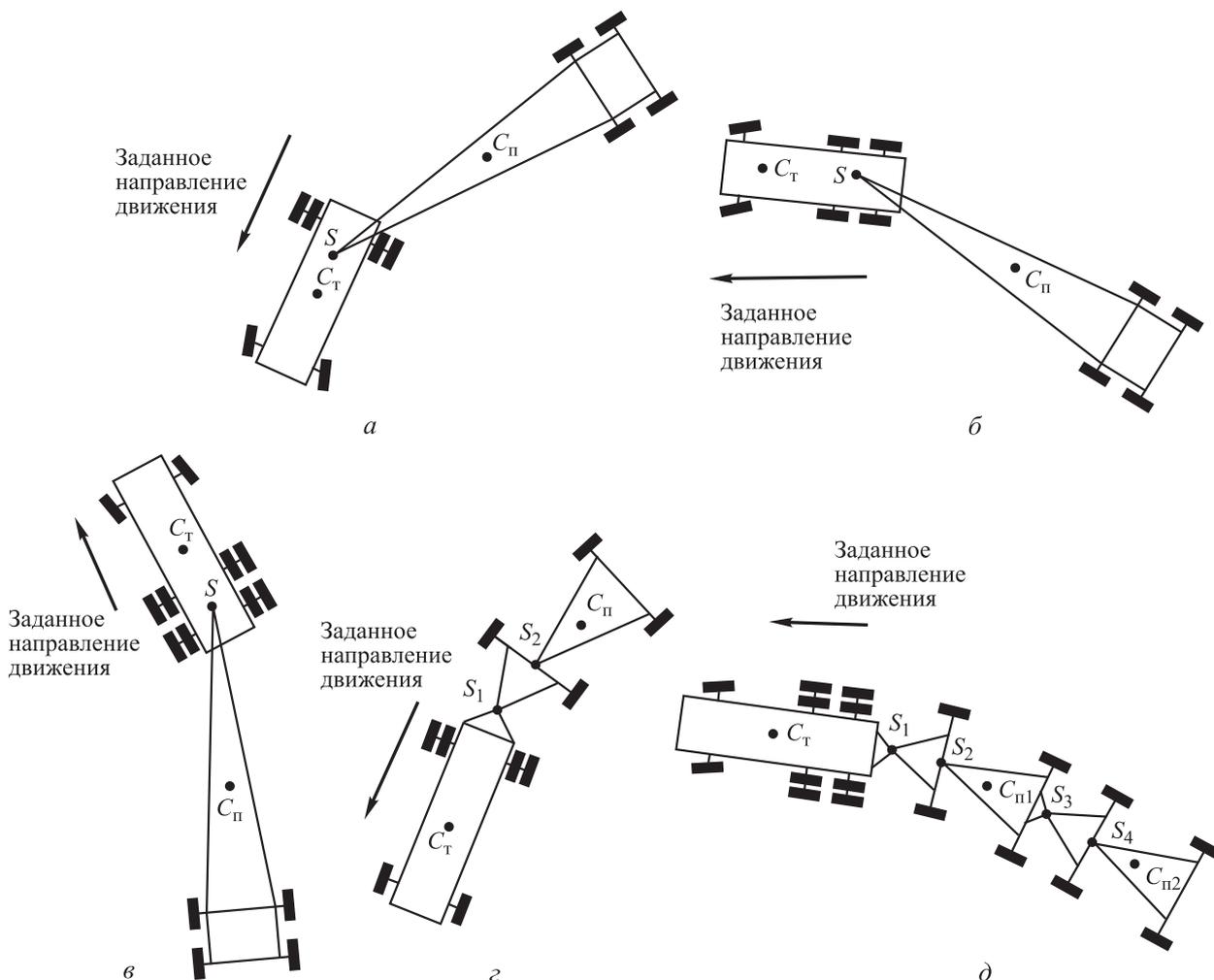


Рис. 3. Конечное положение автопоезда, оснащенного СДС, после окончания торможения в повороте:
 а — тягач (4×2) с полуприцепом; б — тягач (6×4) с односкатными ведущими колесами и полуприцепом;
 в — тягач (6×4) с двухскатными ведущими колесами и полуприцепом; г — тягач (4×2) с одним прицепом;
 д — тягач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

Из рис. 2, а–в видно, что при экстренном торможении в повороте в случае аварийного отказа тормозной системы автопоездов с полуприцепом наибольшей устойчивостью обладает автопоезд с тягачом (6×4), имеющим двухскатные ведущие колеса, у него наименьшее отклонение от заданной траектории. Тягач (4×2) с двухскатными ведущими колесами и тягач (6×4) с односкатными ведущими колесами имеют существенное отклонение от заданной траектории и углы складывания, достигающие соответственно 70 и 85°.

Автопоезд, состоящий из тягача (4×2) и одного прицепа (рис. 2, г), имеет существенное отклонение от заданной траектории и угол складывания, достигающий 30°. Для автопоезда с тягачом (6×4) и двумя прицепами (рис. 2, д) также характерно существенное отклонение от

заданной траектории (угол β превышает 20°), угол складывания достигает 60°.

Во всех этих ситуациях тягач выталкивается полуприцепом на соседнюю полосу движения, что может привести к ДТП с тяжелыми последствиями.

Исследование движения автопоезда, оснащенного СДС. На рис. 3 для автопоездов различной конфигурации, оснащенных СДС, показано конечное положение автопоезда после окончания торможения в повороте.

Из приведенных результатов моделирования (см. рис. 3) следует, что при экстренном торможении в повороте в случае аварийного отказа тормозной системы прицепных звеньев для всех исследованных автопоездов разработанные методы стабилизации движения являются эффек-

тивными и работоспособными. Ни в одном из случаев автопоезд не покидал своей полосы движения, угол складывания снизился на 30...95 %.

Выводы

1. Разработан метод повышения устойчивости автопоездов при экстренном торможении в повороте и отказе тормозной системы прицепа

ных звеньев, позволяющий сохранить траекторную устойчивость автопоезда и избежать ДТП с тяжелыми последствиями.

2. Методами имитационного моделирования доказана работоспособность и эффективность предложенного метода повышения устойчивости автопоездов при экстренном торможении в повороте и отказе тормозной системы прицепных звеньев.

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 Trans Mech*, 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. VehicleElectronConf.*, 1999, pp. 514–519.
- [8] Rodrigues A.O. *Evaluation of an active steering system. Master's degree project*. Sweden, 2004, p 37. URL: http://www.s3.kth.se/~kallej/grad_students/rodriguez_orozco_thesis04.pdf (дата обращения 11 ноября 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, № 77-30569. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/343394.html> (дата обращения 11 ноября 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] 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, вып. 4. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/704685.html>, doi: 10.7463/0414.0704685 (дата обращения 11 ноября 2015)

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] 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. Available at: http://people.kth.se/~kallej/grad_students/rodriguez_orozco_thesis04.pdf (accessed 11 November 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 mnogoosnykh kolesnykh transportnykh kompleksov s uchetom osobennosti konstruksii stepnykh 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 11 November 2015).
- [11] Zhileikin M.M., Chuliukin A.O. Povyshenie ustoichivosti dvizheniia dvukhosnykh avtomobilei za schet avtomaticheskoi korrleksii 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 kontroly* [Industrial Automatic Control Systems and Controllers]. 2015, no. 1, pp. 42–52.
- [12] Zhileikin M.M., Chuliukin A.O. Algoritm raboty sistemy dinamicheskoi stabilizatsii dlia avtomobilia 4x4 s podkliuchaemoi zadnei os'iu [Algorithm of Dynamic Stabilization System for a Car 4x4 with a Link Rear Axle]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2014, no. 4. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/704685.html> (accessed 11 November 2015), doi: 10.7463/0414.0704685.

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).