

УДК 629.113

**Б. Н. Белоусов**, д-р техн. наук, профессор, belousovb@yandex.ru,

**С. В. Наумов**, вед. конструктор, servik1937@yandex.ru, **А. С. Климачкова**, аспирант, wolff\_al@mail.ru,

**Т. И. Ксенович**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., taxen@mail.ru, МГТУ им. Н. Э. Баумана

## Транспортная мехатроника — будущее автомобиля

*Приводятся результаты анализа состояния и развития наземной мобильной техники (в частности, тягово-транспортных средств — автомобилей и тракторов) и прогноз направлений внедрения в их конструкцию мехатронных модулей.*

**Ключевые слова:** автомобиль, мобильный робот, опорно-ходовой модуль, комплекс, следящая система, следящий привод, электрогидравлический привод, система рулевого управления, система поддрессирования колеса

### Введение

В начале 2000-х гг. на страницах многих журналов развернулась дискуссия инженеров о том, с каким автомобилем мир войдет в XXII век. В ходе дискуссии были выделены три группы основных факторов, которые могут повлиять на конструкцию автомобилей в будущем, а именно:

- политические (координация законодательства, техрегулирование и создание единого экономического пространства и т. п.);
- экономические (топливный резерв и инфраструктура его использования, уровень и распределение благосостояния, степень урбанизации или субурбанизации; соотношение применимость/стоимость имеющихся технологий, включая технологии, связанные с безопасностью транспорта и т. п.);
- группа социальных факторов (модели поведения людей, способы проведения досуга, стоимость машин и топлива, проблемы окружающей среды (в той мере, как их воспринимает общество), общественные нормы, принятые по отношению к транспортным средствам и т. п.).

Однако дискуссия не затронула системные технические факторы возможного развития автомобиля. Глубокое изучение всех аспектов, высказанных в ходе дискуссии, и современных тенденций развития автомобилестроения позволили сформулировать главную проблему, имеющую свои внешние и внутренние противоречия, а именно: перед современным автостроением стоит глобальная проблема — создание автомобиля будущего. К внешним противоречиям относится необходимость выполнения требований, оформленных законодательно, к активной и экологической безопасности автомобиля как одного из самых массовых объектов, используемых обществом в настоящее время. Его способность обеспечивать существующие и перспективные требования по активной и экологической безопасности является главным условием, определяющим все

остальные потребительские свойства автомобиля и, тем самым, конкурентоспособность. Следует отметить, что эти требования имеют устойчивую тенденцию к ужесточению. Таким образом, перед машиностроением стоят задачи, которые традиционными для них методами и техническими решениями они выполнить не могут [1–13]. Нужны принципиально новые технические решения в конструкции транспортных средств (ТС), обеспечивающие выполнение текущих и перспективных запросов общества. Такие технические решения разработаны быть не могут, так как нет соответствующих научных положений, закономерностей и принципов прикладной науки — теории автомобиля. В этом заключаются внутренние противоречия обозначенной выше глобальной проблемы.

Главным направлением решения проблемы экологической и энергетической безопасности зарубежные и отечественные специалисты считают разработку и создание электромобильной техники. Это направление требует создания принципиально новой энергетической установки, например электрохимического генератора энергии транспортного типа на базе топливных элементов. Создание энергоустановок на базе топливных элементов имеет также огромное общемашиностроительное значение.

Первым шагом, общепризнанным в мире ученых, при переходе от двигателя внутреннего сгорания как источника энергии подвижных наземных комплексов транспортного и сельскохозяйственного значения (автомобиля, трактора, комбайна, далее — комплексов) к принципиально новой энергетической установке является создание гибридных машин-комплексов.

### Постановка задачи

Основные технические тенденции развития автомобильной техники за рубежом можно свести к следующим положениям.

1. Выявлен устойчивый процесс изменения конструкции наземных ТС, качественного изменения их структуры и состава основных силовых устройств на основе интеграции электронных, электрических, гидравлических, пневматических и механических элементов и существенного повышения роли электроники и систем управления, т. е. широкое внедрение мехатронных систем и модулей в конструкцию автомобиля трактора. Первой мехатронной системой автомобиля можно считать современную тормозную систему. В настоящее время наступил этап симбиоза мехатроники и механических, а также гидравлических, электромеханических и других систем ТС. Его можно характеризовать как переход от модульного построения (рис. 1, см. третью сторону обложки; рис. 2; рис. 3, см. третью сторону обложки) технических систем к системно оптимизированным единым структурам ТС. Процесс начался с проникновения отдельных компонентов в конструкцию ТС. Затем произошло слияние их в единую структуру, реализующую единую целевую функцию на основе функциональных компонентов подобно мультиагентным системам. Эта тенденция распространяется далее и на силовые компоненты. Примеров тому можно привести много.

Таким образом, уже сейчас конструкция основных систем современных зарубежных тягово-транспортных средств — силовой установки, трансмиссии, рулевого управления, системы поддрессоривания, тормозной системы и др., представляют собой сложные технические решения, которые строятся на разных физических принципах и, с точки зрения механики, являются гибридными и не могут быть математически описаны однозначно.

2. Проектированием немеханической части (электронной, электрической, гидравлической, пневматической и др.) систем автомобиля занимаются специалисты из соответствующих областей знаний [14]. Однако применительно к объекту, т. е. к ТС, основные технические требования и принципы, а также методологию применения в конструкции, например автомобилей, гибридных систем как систем мехатронных модулей, формируют автомобилисты-механики. Существующий опыт позволяет сделать главный вывод: механическое использование достижений мехатроники не может дать положительного эффекта. Требуется теория, описывающая закономерности функционирования как отдельных систем ТС и их взаимосвязей, так и объекта в целом. Только на базе этих закономерностей может быть построено алгоритмическое и программное обеспечение эффективной работы мехатронных систем ТС.

3. В мировом автомобилестроении идет интенсивный процесс создания систем автоматического управления движением автомобиля (автономное вождение). В этот процесс вкладывается сотни миллионов долларов. Подобная система управления должна связать системы управления мехатронных модулей (см. рис. 1) в единую систему и выступать

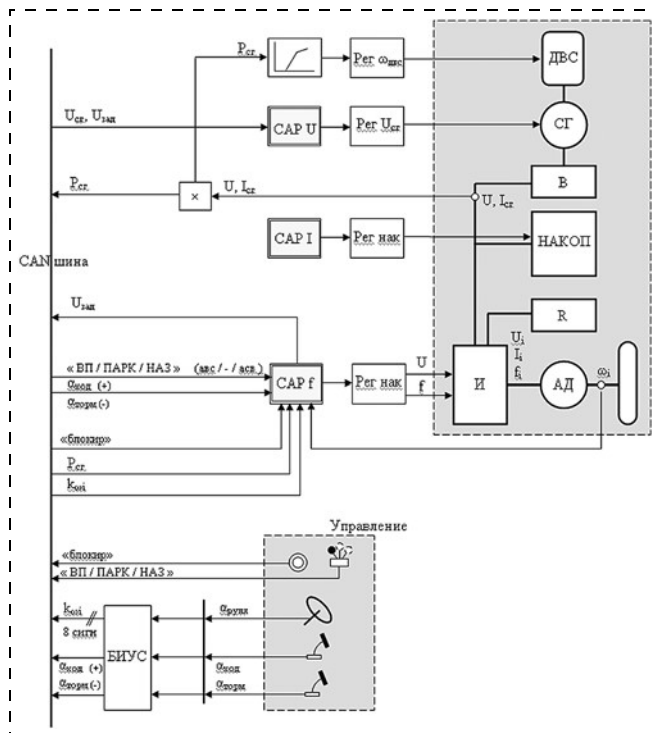


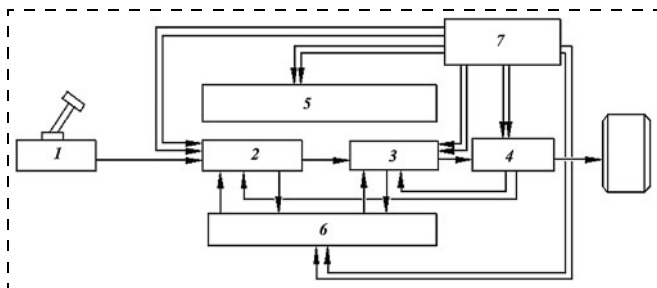
Рис. 2. Принципиальная схема системы автоматического управления (САУ) электроприводом колес ТС как элемента мехатронного опорно-ходового модуля

как система-«дирижер». По данным зарубежных изданий, автомобили с полностью автономной системой вождения следует ожидать на рынке уже в 2020-е годы.

Функции мехатронного транспортного модуля (например, систем рулевого управления и поддрессоривания колес) хорошо обеспечиваются электрогидравлическими приводами различных типов. Подобные привода хорошо встраиваются в систему удаленного телерадиоуправления машинами. С точки зрения конструктивной реализации наиболее целесообразным представляется применение следящих электрогидравлических приводов.

Рассмотрим этот тезис на примере. Рулевой привод как основная подсистема САУ рулевого управления (РУ) предназначен для передачи воздействия водителя (нагрузки от сошки рулевого механизма — для механических приводов) к управляемым колесам. Исходя из анализа перспективных схем рулевого управления можно сказать, что привод РУ автомобилей должен удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать различные схемы поворота автомобиля;
- полностью использовать психофизиологические и энергетические возможности водителя;
- использовать системы стабилизации в контуре управления автомобилем, обеспечивающие упрощение вождения и уменьшение утомляемости водителя;
- обеспечивать возможность применять системы автоматизированного вождения по программам,



**Рис. 4. Принципиальная схема САУ РУ:**

1 — блок управления рулевой колонки с автоматами загрузки рулевого колеса; 2 — БУК; 3 — бортовой вычислитель; 4 — блок исполнительных механизмов; 5 — блок контрольно-измерительной аппаратуры; 6 — диагностическая система; 7 — система энергоснабжения

навигационным сигналам автоматизированного управления движением в колоннах (в частности, возможно автоматическое выполнение стандартных эксплуатационных маневров, внешнее радиотелеуправление автомобилем и др.).

Место привода РУ в принципиальной схеме автоматизированной бортовой системы РУ, разработанной и испытанной в МГТУ им. Н. Э. Баумана, в общем виде представлено на рис. 4.

Работа САУ РУ осуществляется в командном режиме (управление осуществляет водитель) или автоматическом (по программе или телерадиосигналам).

Информация об угле поворота рулевого колеса 1 (возможно поступление одновременно нескольких сигналов при изменяемой схеме поворота многоосного автомобиля) поступает в блок управления и контроля (БУК) 2, оценивающий внешние параметры автомобиля (скорость, ускорение и т. д.), и далее в бортовой вычислитель 3, который формирует управляющие сигналы на все исполнительные механизмы 4.

Основная программа работы вычислителя устанавливается водителем в соответствии с дорожной обстановкой. Дополнительная информация поступает на вычислитель от БУК 2.

Входная информация может иметь как цифровую, так и аналоговую форму. В последнем случае она предварительно подвергается аналого-цифровому преобразованию. Каналы связи могут быть электрическими и оптическими (оптоволоконными).

Управляющие сигналы поступают к исполнительным механизмам 4 через каналы управления БУК 2. В БУК происходит сравнение заданного сигнала с сигналом обратной связи, несущим информацию о фактическом состоянии исполнительного механизма.

Система диагностики 6 проверяет правильность функционирования отдельных узлов и агрегатов САУ РУ. В случае обнаружения отказа в системе или нештатного реагирования на управляющие сигналы система диагностики отключает неисправный блок (элемент), выполняет необходимые аварийные изменения в системе САУ РУ и выдает сигнал на систему навигации, находящуюся в кабине водителя.

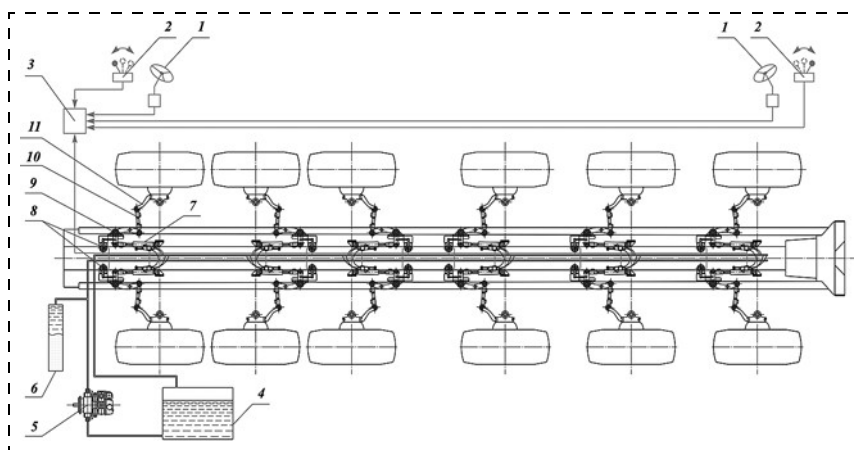
Если восстановление работоспособности канала за счет внутреннего резервирования невозможно, то система диагностики приводит колеса поврежденных каналов в среднее положение, включая внешнее и внутреннее тревожное освещение или (при необходимости) систему аварийной остановки автомобиля.

Следящие электрогидравлические привода можно разделить на две большие группы — централизованный привод (рис. 5), в котором предполагается установка одной гидравлической системы питания на машину, и автономный привод (рис. 6), представляющий собой множество гидравлических систем, установленных на каждом колесе.

Основной недостаток централизованных приводов при их установке на многоосную колесную машину — необходимость применения гидравлических магистралей большой длины, что снижает жесткость привода, повышает инертность рабочего тела и, как следствие, приводит к фазовому сдвигу поворота колес.

Применение автономных приводов позволяет рассчитывать на целый ряд преимуществ, например, сокращение длины гидравлических магистралей.

На сегодняшний день опыт применения подобных систем в рулевом управлении колесных машин крайне мал, и можно говорить об отсутствии научно обоснованных принципов их построения, а также об отсутствии технических требований к ним и к объектам, в которых целесообразно



**Рис. 5. Схема гидросистемы всеколесного РУ макетного образца с колесной формулой 12 × 12.1 с централизованным приводом:**

1 — рулевые механизмы с датчиками угла поворота; 2 — датчики полюса поворота; 3 — бортовой вычислительный комплекс (БВК), гидравлическая система; 4 — масляный бак; 5 — насос; 6 — гидропневмоаккумулятор; 7 — бустер (предохранительный клапан, фильтр, контрольно-измерительная аппаратура на схеме не показаны); 8 — датчики обратной связи (ДОС) с приводом; 9 — кронштейны с рычагами; 10 — поперечные тяги; 11 — сошки

их применение. Кроме того, применение автономных приводов требует решения целого ряда технических проблем.

Подобное же заключение можно сделать и по приводам в других системах автомобиля/трактора.

### Заключение

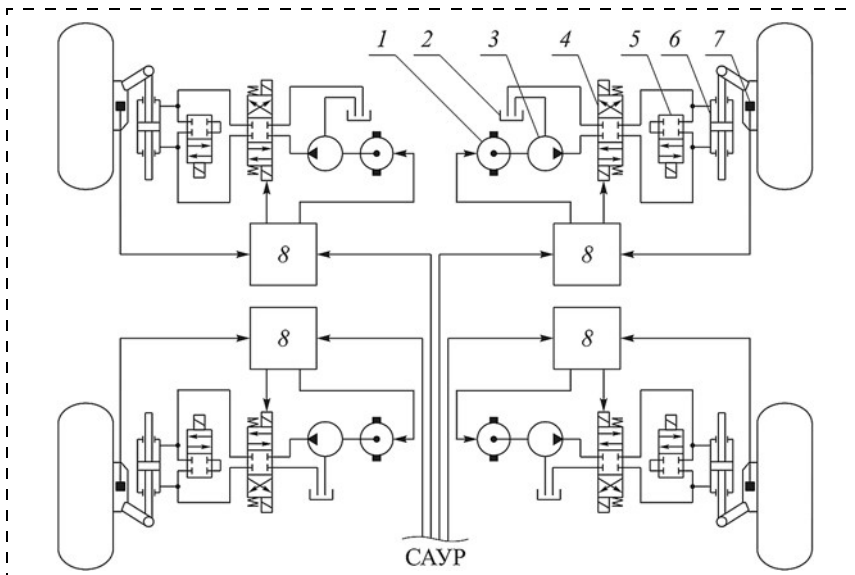
Таким образом, основное направление развития современной конструкции ТС как автомобиля будущего лежит в области широкого использования в конструкции мехатронных модулей и мехатронных систем. Их эффективное использование требует строго алгоритмического и программного обеспечения, построенного на базе прикладной механики — теории автомобиля (трактора). Создание подобной теории как уточнения существующей теории автомобиля и трактора является одной из главных задач прикладной механики.

Дальнейшее развитие автомобиля связано с созданием мехатронных систем, с использованием новых способов распределения и передачи мощности от двигателя внутреннего сгорания к колесу на их основе. Будущее автомобиля/трактора связано с созданием гибких моторно-трансмиссионных установок с электрическим или гидрообъемным приводом колес. При этом электротрансмиссия, как и гидрообъемный привод, с системой управления движением ТС представляет собой сложную мехатронную систему. Таким образом, проявляется процесс существенной трансформации конструкции ТС, качественного изменения их структуры и состава основных силовых устройств, интеграции электронных и механических элементов и повышения роли электроники (как силовой, так и управляющей) и систем управления, т. е. широкое внедрение мехатронных модулей в конструкцию автомобиля.

На протяжении ряда лет МГТУ им. Н. Э. Баумана успешно ведет фундаментальные и поисковые исследования в области развития теории и создания колесных транспортных систем на основе мехатронных систем и модулей, а также роботизированных платформ как роботов среднего класса.

### Список литературы

1. **Смирнов Г. А.** Многоосные многоприводные автомобили с автоматизированными системами // Автомобильная промышленность. 1997. № 9. С. 9—10.
2. **Динамика** системы "Дорога—шина—автомобиль—водитель" / А. А. Хачатуров, В. Л. Афанасьев, В. С. Васильев и др.; Под общей редакцией А. А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 1976. 554 с.
3. **Брянский Ю. А.** Управляемость большегрузных автомобилей. М.: Машиностроение, 1983. 176 с.



**Рис. 6. Схема автономного привода поворота колеса (АП):**  
1 — электродвигатель; 2 — бак; 3 — гидронасос; 4 — гидрораспределитель; 5 — клапан кольцевания; 6 — гидроцилиндр поворота колеса; 7 — датчик обратной связи; 8 — блок управления поворотом колеса; САУР — система автоматического управления рулевым приводом

4. **Шарапов В. Д.** Активные подвески транспортных средств. Рига: РВВПКУ, 1980. 265 с.
5. **Иродов В. В.** Исследование влияния эксплуатационных свойств (плавности хода, тормозных свойств, устойчивости и управляемости) на производительность автопоездов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. М., 1982. 230 с.
6. **Ревин А. А.** Повышение эффективности, устойчивости и управляемости при торможении автотранспортных средств: Дис. ... докт. техн. наук: 05.05.03. Волгоград, 1983. 516 с.
7. **Антонов Д. А.** Теория устойчивости движения многоосных автомобилей. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.
8. **Фаробин Я. Е.** Теория поворота транспортных машин. М.: Машиностроение, 1970. 176 с.
9. **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.
10. **Белоусов Б. Н., Шушман С. Б.** Прикладная механика наземных тягово-транспортных средств с мехатронными системами / Под общ. ред. Б. Н. Белоусова. М.: Агроконсалт, 2013. 612 с.
11. **Болдоров А. Г., Наумов С. В.** Метод расчета гидравлической системы многоосных машин с всеколесным рулевым управлением // Гидрогазодинамика, гидравлические машины и гидропневмосистемы: Тр. Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. М., 2006. С. 151—153.
12. **Брянский Ю. А.** Управляемость большегрузных автомобилей. М.: Машиностроение, 1983. 176 с.
13. **Кулешов В. С., Лакота Н. А.** Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы. М.: Машиностроение, 1986. 328 с.
14. **Егоров О. Д., Подураев Ю. В.** Мехатронные модули. Расчет и конструирование: учебное пособие. М.: Изд. МГТУ "СТАНКИН", 2004. 360 с.
15. **Подураев Ю. В.** Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
16. **Autonomous Mechatronics-Based Locomotion Module for Multi-Wheel Vehicle and Terrestrial Robot Applications** / B. N. Belousov [и др.] // Commercial Vehicle Engineering Congress 2012 [Rosemont, Illinois USA]. URL: <http://papers.sae.org/2012-01-1913> (дата обращения 13.08.2014).

17. **Milliken W. F., Jr.** et al. Research in Automobile Stability and Control and in Tire Performance. Collection of papers. London: The Institution of Mechanical Engineers, 1956.

18. **Andreev A. F., Kabanau V. I., Vantsevich V. V.** Driveline Systems of Ground Vehicles: Theory and Design / V. V. Vantsevich, Scientific and Engineering Editor. Taylor & Francis Group/CRC Press, 2010. 792 p.

19. **Yokoyama M., Hedrick J. K., Toyama S.** A model Following Sliding Mode Controller for Semi-Active Suspension Systems with

MR Dampers // Proc. of the American Control Conference. Arlington (VA). 2001. P. 53–58.

20. **Gordaninejad F., Kelso S. P.** Fail-Safe Magneto-Rheological Fluid Dampers for Off-Highway, High-Payload Vehicles // Journal of Intelligent Material System and Structures. 2000. V. 11, N. 5. P. 395–406.

21. **Reinelt W., Klier W., Reimann G., Schuster W., Grossheim R.** "Active Front Steering (Part 2): Safety and Functionality", SAE. 2004. Paper 2004-01-1101.

**B. N. Belousov**, Professor, belousovbn@ya.ru, **S. V. Naumov**, Chief designer, servik1937@yandex.ru, **A. S. Klimachkova**, Postgraduate student, wolff\_al@mail.ru, **T. I. Ksenevich**, Leading researcher, taxen@mail.ru, Bauman Moscow State Technical University, Scientific and production center "Special machinery"

## Mechatronics — Future for Vehicles

*The article describes analysis of land vehicles development (tractors, automobiles etc). There are three main branches (aims) of modern vehicles development. Firstly, application of mechatronics modules and systems for designing nowadays vehicles are believed to be an up-to date constructing method. Thus a vehicle for future will be consists of different modules. Secondly, a new theory should be developed. The theory should describe designing/control principles of the modules and their interaction as part of the main system. Thirdly, the main control system of all the mechatronics modules should be developed. Due to the control system autonomous driving can be designed. BMSTU has been studying the issues described. For example a mechatronics-based locomotion module for vehicle is being developed. All wheel steering as one of the main functions of the mechatronics-based locomotion module is considered. The steering drive place in conceptual scheme of automated steering system, developed and tested by researches in BMSTU, is shown. Comparison between all wheel steering with an independent drive and all wheel steering with centralized drive are proposed. Thus we can conclude that the main tendency of modern vehicle designing is application and development mechatronic modules and systems. The next articles will describes further BMSTU research connected with the mechatronics-based locomotion module, its designing and modeling approach.*

**Keywords:** car, mobile robot, support-suspension module, a complex servo system, servo drive, electro-hydraulic, steering system, suspension system wheel

### References

1. **Smirnov G. A.** Mnogoosnye mnogoprivodnye avtomobili s avtomatizirovannymi sistemami. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 1997. N. 9. P. 9–10.

2. **Dinamika** sistemy "Doroga—shina-avtomobil"—voditel". A. A. Khachaturov, V. L. Afanas'ev, B. C. Vasil'ev i dr.; Pod obshchey redaktsiyey A. A. Khachaturova. M.: Mashinostroenie, 1976. 554 p.

3. **Bryanskiy Yu. A.** Upravlyaemost' bol'shegruznykh avtomobiley. M.: Mashinostroenie, 1983. 176 p.

4. **Sharapov V. D.** Aktivnye podveski transportnykh sredstv. Riga: RVVPKU, 1980. 265 p.

5. **Irodov V. V.** Issledovanie vliyaniya ekspluatatsionnykh svoystv (plavnosti khoda, tormoznykh svoystv, ustoychivosti i upravlyaemosti) na proizvoditel'nost' avtopoezdov: Dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.03. M., 1982. 230 p.

6. **Revin A. A.** Povyshenie effektivnosti, ustoychivosti i upravlyaemosti pri tormozhenii avtotransportnykh sredstv: Dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.05.03. Volgograd, 1983. 516 p.

7. **Antonov D. A.** Teoriya ustoychivosti dvizheniya mnogoosnykh avtomobiley. M.: Mashinostroenie. 1978. 216 p.

8. **Farobin Ya. E.** Teoriya povorota transportnykh mashin. M.: Mashinostroenie, 1970. 176 p.

9. **Belousov B. N., Popov S. D.** Kolesnye transportnye sredstva osobo bol'shoy gruzopod'emnosti. Konstruktsiya. Teoriya. Raschet / Pod obshch. red. B. N. Belousova. M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2006. 728 p.

10. **Belousov B. N., Shushman S. B.** Prikladnaya mekhanika nazemnykh tyagovo-transportnykh sredstv s mekhatronnymi sistemami. Monografiya. Pod obshch. red. B. N. Belousova. M.: Agrokonsalt, 2013. 612 p.

11. **Boldorev A. G., Naumov S. V.** Metod rascheta gidravlicheskoys sistemy mnogoosnykh mashin s vsekolosnym rulevym upravleniem. *Gidrogazodinamika, gidravlicheskie mashiny i gidropnevmosistemy: Tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. i nauch.-metod. konf.* M., 2006. P. 151–153.

12. **Bryanskiy Yu. A.** Upravlyaemost' bol'shegruznykh avtomobiley. M.: Mashinostroenie. 1983. 176 p.

13. **Kuleshov V. S., Lakota N. A.** Distanttsionno upravlyaemye roboty i manipulyatory. M.: Mashinostroenie, 1986. 328 p.

14. **Egorov O. D., Poduraev Yu. V.** Mekhatronnye moduli. Raschet i konstruirovaniye. Uchebnoye posobie. M.: Izd. MGTU "STANKIN", 2004. 360 p.

15. **Poduraev Yu. V.** Mekhatronika: osnovy, metody, primeneniye: ucheb. posobie dlya studentov vuzov. M.: Mashinostroenie, 2006. 256 p.

16. **Autonomous** Mechatronics-Based Locomotion Module for Multi-Wheel Vehicle and Terrestrial Robot Applications / B. N. Belousov [i dr.]. Commercial Vehicle Engineering Congress 2012 [Rosemont, Illinois USA]. URL: <http://papers.sae.org/2012-01-1913> (date access 13.08.2014).

17. **Milliken W. F., Jr.** et al. Research in Automobile Stability and Control and in Tire Performance. Collection of papers. London: The Institution of Mechanical Engineers, 1956.

18. **Andreev A. F., Kabanau V. I., Vantsevich V. V.** Driveline Systems of Ground Vehicles: Theory and Design. V. V. Vantsevich, Scientific and Engineering Editor. Taylor & Francis Group/CRC Press, 2010. 792 p.

19. **Yokoyama M., Hedrick J. K., Toyama S.** A model Following Sliding Mode Controller for Semi-Active Suspension Systems with MR Dampers. *Proc. of the American Control Conference*. Arlington (VA). 2001. P. 53–58.

20. **Gordaninejad F., Kelso S. P.** Fail-Safe Magneto-Rheological Fluid Dampers for Off-Highway, High-Payload Vehicles. *Journal of Intelligent Material System and Structures*. 2000. V. 11, N. 5. P. 395–406.

21. **Reinelt W., Klier W., Reimann G., Schuster W., Grossheim R.** Active Front Steering (Part 2): Safety and Functionality, SAE. 2004. Paper 2004-01-1101.