

Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 5 (979). – С. 199 – 210. 7. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – 13-е изд., исправленное. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., – 1986. – 544 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Korolev, A. V. *Issledovanie processov obrazovanija poverhnostej instrumenta i detali pri abrazivnoj obrabotke.* Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1975. Print. 2. Husu, A. N., U. R. Vitenberg and V. A. Pal'mov. *Sherohovatos' poverhnostej (teoretiko-verojatnostnyj podhod).* Moscow: Izd-vo «Nauka», 1975. Print. 3. Novoselov, J. K. *Dinamika formoobrazovanija poverhnostej pri abrazivnoj obrabotke.* Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1979. Print. 4. Novikov, F. V. *Fizicheskie i kinematicheskie osnovy vysokoproizvoditelnogo almaznogo shlifovanija. Avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni d-ra tehn. Nauk.* Odessa, 1995. Print. 5. Novikov, F. V., and V. G. Shkurupij. "Issledovanija sherohovatosi poverhnosti pri almazno-abrazivnoj obrabotke metodami teorii verojatnostej." *Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prac'.* No. 44. Kharkiv: NTU «KhPI», 2004. 140–149. Print. 6. Novikov, F. V., V. V. Nezhebovs'kij and V. G. Shkurupij. "Matematychna model' vyznachen-nja shorstkosti poverhni pry abrazivnij obrobci." *Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prac'. Ser.: Matematyчне modeljuvannja v tehnici ta tehnologijah.* No. 5 (979). Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. 199–210. Print. 7. Bronshtejn, I. N., and K. A. Semendjaev. *Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashhijhsja vuzov. 13-e izd., ispravlennoe.* Moscow: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit. 1986. Print.

Надійшла (received) 06. 08.2014

УДК 629.017:681.532.58

**С.Н. ШУКЛИНОВ**, д-р техн. наук, доц. ХНАДУ, Харьков

## **РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТОРМОЖЕНИЕМ АВТОМОБИЛЯ С ЧАСТИЧНО АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ТОРМОЗНЫМ ПРИВОДОМ**

Приведены результаты моделирования процесса торможения автомобиля с адаптивной автоматизированной системой управления в случае частично автоматизированного тормозного привода. Дана оценка изменения замедления автомобиля при действии возмущающих внешних и внутренних факторов в случаях с адаптивным управлением и без адаптивного управления при заданном усилии на педали тормоза. Представлены зависимости изменения корректирующего воздействия на поршне управления вакуумного усилителя тормозного привода, сформированного исполнительным устройством адаптивной системы управления, при торможении груженого автомобиля и при отказе одного тормозного контура во время торможения. Результаты моделирования показывают, что адаптивное управление в частично автоматизированном тормозном приводе обеспечивает инвариантное управление торможением автомобиля при действии возмущающих факторов.

**Ключевые слова:** автомобиль, система, тормозное управление, замедление, усилие на педали тормоза, давление жидкости.

**Введение.** Характер процесса управления торможением в автоматизированной системе управления задает водитель. Для улучшения эргономических параметров и повышения качества управления торможением автомоби-

ля автоматизированная система должна обладать адаптивными свойствами. В случае качения тормозного колеса в доэкстремальном режиме, при котором тормозная сила на любом колесе меньше максимальной возможной силы сцепления колеса с поверхностью дороги в данных условиях, адаптивная система может обеспечить инвариантный режим управления тормозами. При этом снижается степень утомления водителя во время управления автомобилем и, как следствие, повышается безопасность движения.

**Анализ последних исследований.** Исследованию адаптивного управления торможением автомобиля в доэкстремальном режиме качения тормозных колес, посвящено ряд работ [1 – 5]. Авторами работы [1] предложен закон адаптивного управления торможением автомобиля, позволяющий в доэкстремальном режиме качения тормозных колес обеспечить инвариантный режим управления тормозами. Оценка устойчивости адаптивной системы управления тормозами автомобиля выполнена в работе [2], как для случая автоматизированного, так и для случая, частично автоматизированного тормозного привода. Авторами работ [3, 4] выполнено математическое описание и имитационное моделирование динамики торможения колесной машины с адаптивным электропневматическим приводом тормозов. Вопросы моделирования динамики торможения автомобиля с адаптивным управлением в доэкстремальном режиме качения тормозных колес в случае частично автоматизированного гидравлического тормозного привода рассмотрены в работе [5].

Следует отметить, что оценка изменения замедления, вследствие действия возмущающих факторов, при торможении автомобиля с частично автоматизированным тормозным приводом с заданным усилием на педали тормоза не проводилась.

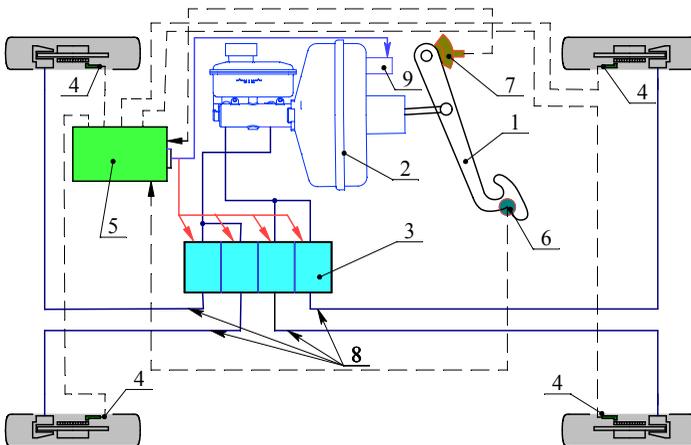


Рис. 1 – Схема тормозного управления автомобиля с частично автоматизированным приводом: 1 – педальный привод; 2 – главный тормозной цилиндр с вакуумным усилителем тормозов; 3 – модулятор АБС; 4 – датчики частоты вращения колес; 5 – блок управления; 6 – датчик усилия на педали тормоза; 7 – датчик перемещения педали тормоза; 8 – трубопроводы; 9 – электромагнит управления клапанами исполнительного устройства адаптивной системы.

**Цель и постановка задачи.** Целью данной работы является проведение имитационного моделирования процесса торможения автомобиля с адаптивной автоматизированной системой управления в случае частично автоматизированного тормозного привода и оценка изменения замедления, вследствие действия возмущающих факторов, при заданном усилии на педали тормоза.

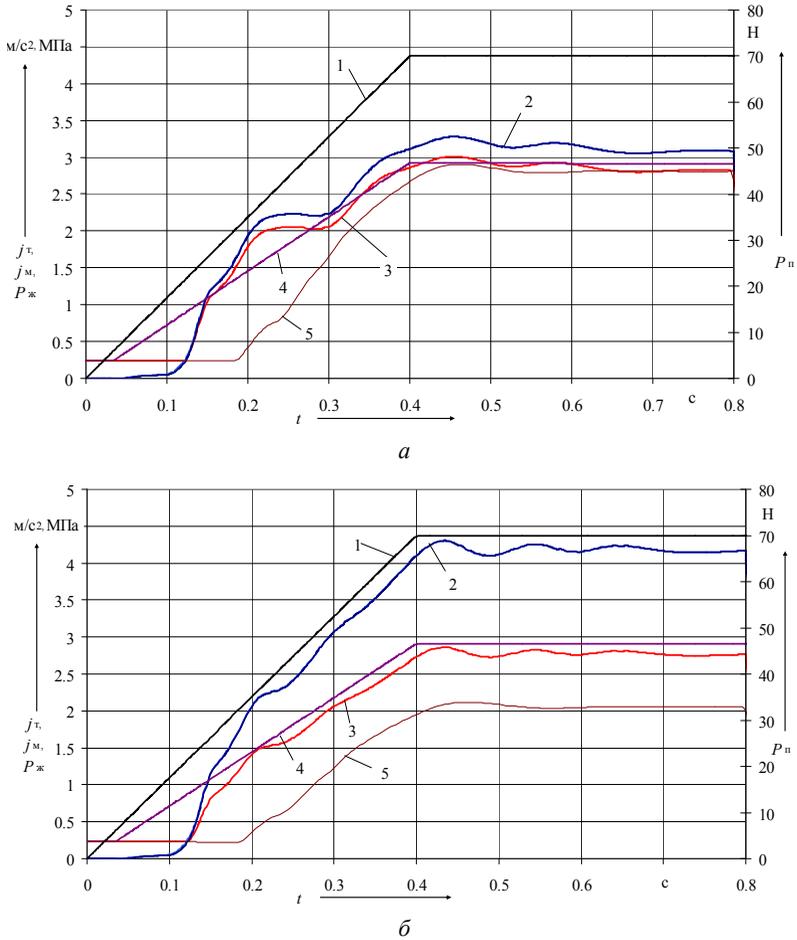


Рис. 2 – Изменение параметров торможения автомобиля: *а* – автомобиль в снаряженном состоянии ( $m_a = 1760$  кг); *б* – в груженом состоянии ( $m_a = 2450$  кг); 1 – усилие на педали тормоза  $P_n$ ; 2 – давление жидкости  $p_j$  в переднем тормозном контуре; 3 – замедление  $j_T$  автомобиля; 4 – замедление  $j_M$  модели автомобиля; 5 – замедление  $j_T$  автомобиля с выключенной адаптивной системой.

Задачей работы является имитационное моделирование процесса торможения и оценка изменения замедления автомобиля вследствие действия

возмущающих факторов. Схема тормозного управления с адаптивными функциями представлена на рис. 1. Исполнительное устройство адаптивной автоматизированной системы управления сформировано в вакуумном усилителе тормозов 2 в виде вакуумной камеры, взаимодействующей с поршнем управления. Формирование корректирующего воздействия в блоке адаптивного регулятора происходит на основе сравнения реализуемого замедления и желаемого. Блок управления 5 формирует сигналы для электропневматических клапанов 9 и обрабатывает наполнение и опорожнение вакуумной камеры исполнительного устройства при действии возмущающих факторов.

Исследовалось изменение замедления при служебном торможении с одинаковым значением усилия на педали и темпом его приложения при действии возмущающих факторов, причём как с включенной, так и с выключенной адаптивной системой.

Для оценки свойств управления торможением принята эталонная модель – торможение автомобиля без груза с тормозной системой, на которую не действуют ни какие возмущающие факторы.

**Моделирования и анализ процесса торможения колесной машины с адаптивной автоматизированной системой управления в частично автоматизированном тормозном приводе.** Моделирование выполнялось для автомобиля с параметрами соответствующими автомобилю УАЗ – 3151. На рис. 2 представлены результаты моделирования динамической стадии управления торможением автомобиля.

Отклонение значения установившегося замедления автомобиля от установившегося замедления модели при включенной системе составляет 2,8 и 4,8 % соответственно для не груженого и груженого состояния. В случае торможения с выключенной системой адаптивного управления это отклонение составляет соответственно 3,4 и 29,6 %.

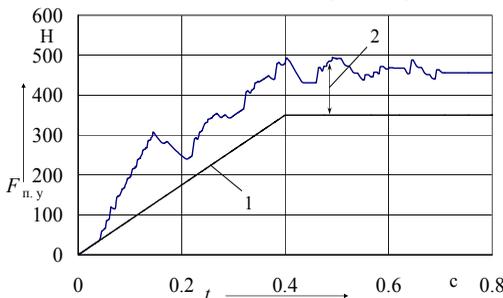


Рис. 3 – Изменение усилия на поршне управления вакуумного усилителя тормозов при торможении груженого автомобиля с включенной адаптивной системой: 1 – задающее воздействие, сформированное водителем; 2 – корректирующее усилие на поршне управления, сформированное исполнительным устройством адаптивной системы управления.

Таким образом, в случае торможения груженого автомобиля без адаптивной системы управления водителю для обеспечения такого же замедления, как и в не груженом состоянии, необходимо увеличить усилие на педали на 29,6 %.

В случае торможения груженого автомобиля с адаптивной системой управления вакуумная камера исполнительного устройства увеличивает усилие на поршне управления  $F_{п.у}$  вакуумного усилителя тормозов (рис. 3). В этом случае обеспечивается замедление автомобиля, пропорциональное усилию

на педали тормоза, независимо от степени загрузки автомобиля. Результаты моделирования аварийного торможения автомобиля в случае отказа заднего тормозного контура представлены на рис. 4, 5. При включенной адаптивной системе управления после разгерметизации заднего контура в момент времени  $A$  давление жидкости  $p_{ж}$  в тормозных контурах и соответственно замедление автомобиля снижаются в течение 0,05 с, а затем начинается незначительный рост их в течение 0,25 с (рис. 4 а). Снижение значений указанных параметров

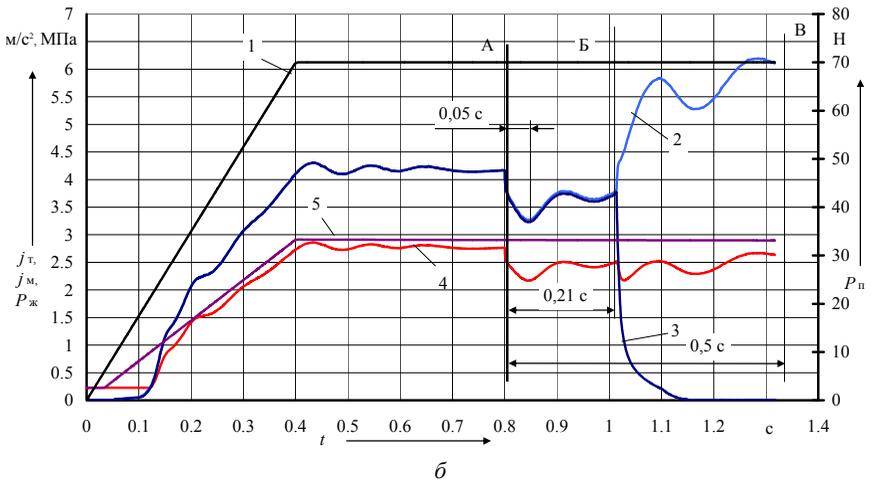
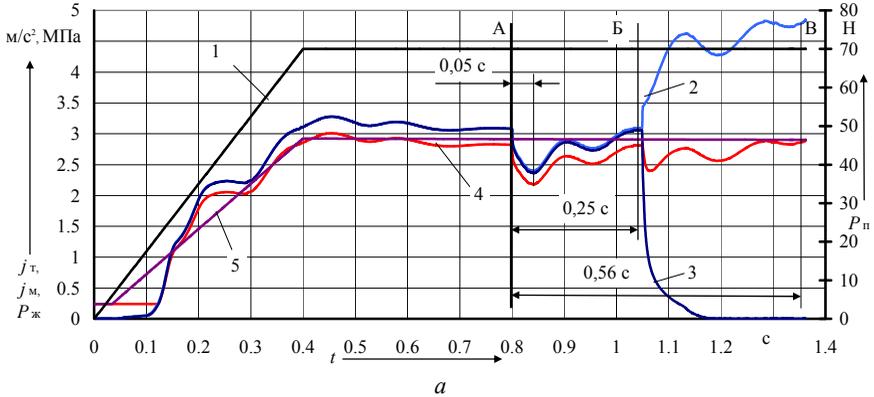


Рис. 4 – Изменение параметров торможения автомобиля с адаптивным управлением при отказе заднего тормозного контура:  $a$  – автомобиль в снаряженном состоянии ( $m_a = 1760$  кг);  $b$  – автомобиль в груженом состоянии ( $m_a = 2450$  кг); 1 – усилие на педали тормоза; 2 – давление жидкости в переднем тормозном контуре; тормоза; 3 – давление жидкости в заднем тормозном контуре; 4 – замедление автомобиля; 5 – замедление  $j_m$  для модели автомобиля.

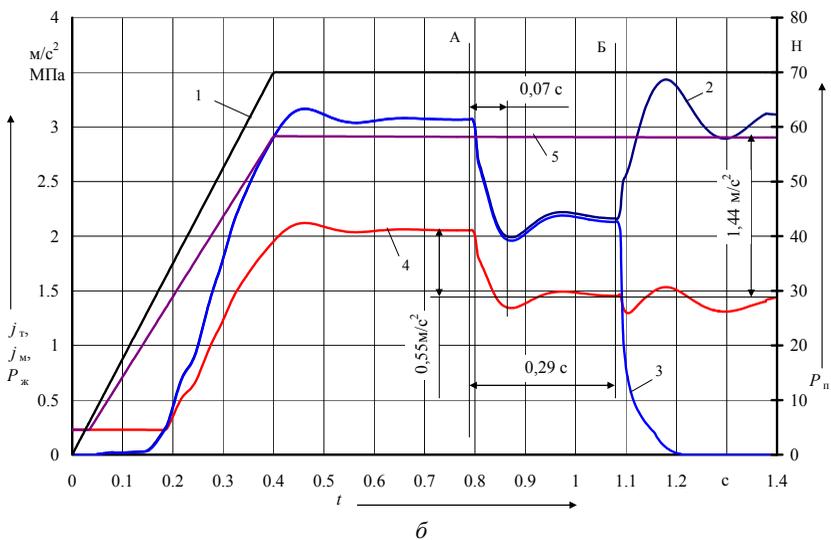
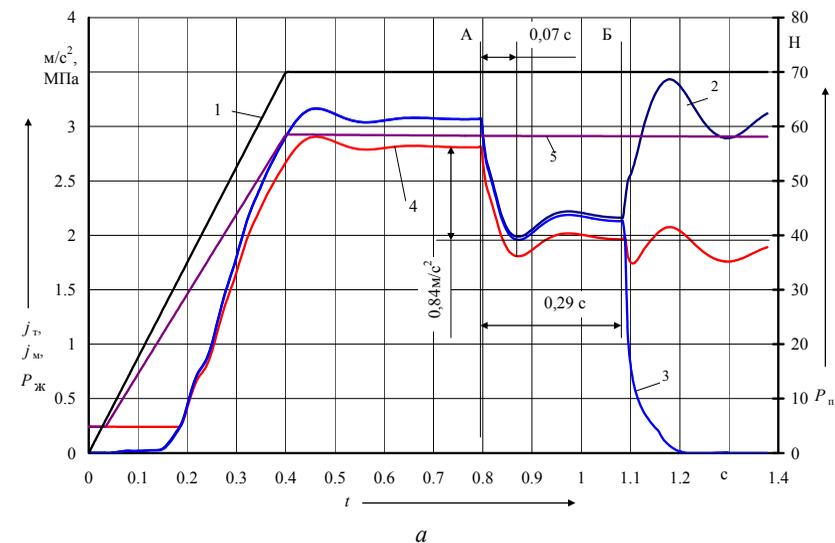


Рис. 5 – Изменение параметров торможения автомобиля без адаптивного управления при отказе заднего тормозного контура: *a* – автомобиль в снаряженном состоянии ( $m_a = 1760$  кг); *б* – автомобиль в груженом состоянии ( $m_a = 2450$  кг); обозначения те же, что и на рис. 4.

обусловлено разгерметизацией тормозного контура. При снижении замедления активируется адаптивная система, и её исполнительное устройство дополнительно увеличивает усилие на поршне управления вакуумного усили-

теля тормозов (точка *A* на рис. 4). При этом оба поршня главного тормозного цилиндра типа *тандем* перемещаются до соприкосновения поршня заднего контура с упором (точка *B*, рис. 4).

Дальнейшее перемещение поршня главного тормозного цилиндра переднего тормозного контура определяет повышение давления в работающем контуре 2 (рис. 4).

Это обеспечивает восстановление значения замедления снаряженного автомобиля при торможении аварийной тормозной системой до значения, соответствующего торможению рабочей тормозной системой. Следует заметить, что при этом усилие на педали тормоза водителем не изменялось. Процесс адаптации совершается без участия водителя за 0,56 с (точка *B*, рис. 4 *a*).

В случае отказа заднего контура во время торможения груженого автомобиля (рис. 4 *б*) ошибка управления замедлением в результате автоматической адаптации не превышает 8,9% от значения замедления при торможении рабочей тормозной системой. На рис. 6 представлен характер изменения суммарного усилия на поршне управления. При отказе тормозного контура задающее воздействие дополнительно увеличивается в результате действия адаптивной системы управления.

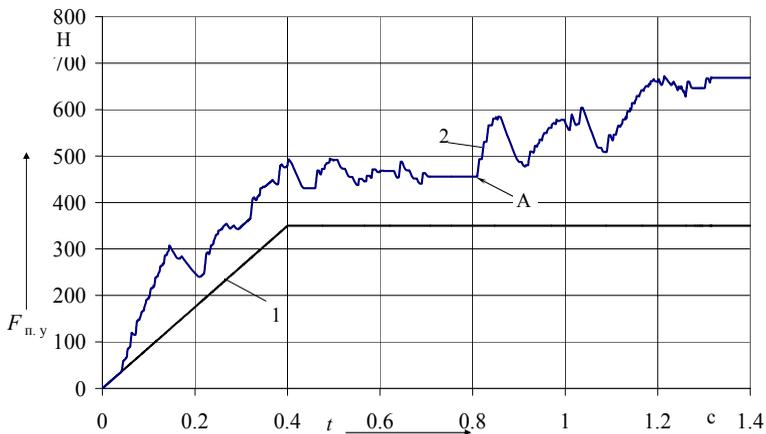


Рис. 6 – Изменение усилия на поршне управления вакуумного усилителя тормозов при отказе заднего тормозного контура во время торможения: 1 – задающее воздействие на поршне управления сформированное водителем; 2 – суммарное усилие на поршне управления, сформированное водителем и исполнительным устройством адаптивной системы управления; *A* – начало коррекции заданного воздействия при отказе тормозного контура.

При торможении без адаптивной системы установившееся замедление автомобиля с увеличением его массы принимает меньшее значение (рис. 5 *б*). Для автомобиля с массой 2450 кг замедление при таком же усилии на педали будет меньше на 29,6 % по сравнению с автомобилем массой 1760 кг. В дан-

ном случае функции адаптивного регулятора должен выполнять водитель, коррекцией усилия на педали тормоза.

После отказа тормозного контура во время торможения без адаптивного управления (точка *A*, рис. 5) происходит еще большее снижение эффективности торможения автомобиля. В этом случае установившееся замедление автомобиля в груженом состоянии уменьшается на 26,8 % по сравнению с торможением рабочей тормозной системой и на 50 % по сравнению с торможением рабочей тормозной системой автомобиля в снаряженном состоянии.

**Выводы.** Таким образом, в данной работе установлено, что адаптивное управление в частично автоматизированном тормозном приводе обеспечивает инвариантное управление торможением автомобиля при действии возмущающих факторов. Исполнительное устройство адаптивной системы управления помогает водителю в формировании задающего воздействия управления. При максимальном изменении массы в эксплуатации автомобиля адаптивная система облегчает управление тормозами почти на 30 %, а в случае отказа заднего тормозного контура – до 50 %. Следует заметить, что при этом уменьшается не только физическое усилие на педали тормоза, но снижается и психофизиологическая нагрузка водителя.

**Список литературы:** 1. Туренко А.Н., Шуклинов С.Н. Адаптивное тормозное управление колесных машин // Журнал автомобильных инженеров. – 2010. – № 5 (64). – С. 18 – 21. 2. Туренко А.Н., Шуклинов С.Н., Вербицкий В.И. Оценка устойчивости системы адаптивного управления тормозами // Сб. науч. тр. ХНАДУ «Автомобильный транспорт». – Вып. 28. – Х., 2011. – С. 7 – 11. 3. Туренко А.Н., Шуклинов С.Н., Михалевиц Н.Г. Электропневматический привод тормозов с адаптивным управлением // Изв. ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы», Вып. 4: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 12(85). – С. 51 – 53. 4. Туренко А.Н., Шуклинов С.Н., Михалевиц Н.Г. Моделирование динамики колесной машины с адаптивным электропневматическим приводом тормозов // Вестник ХНАДУ. – Х., 2012. – Вып. 56. – С. 66 – 74. 5. Шуклинов С.Н. Моделирование процесса торможения автомобиля с адаптивным частично автоматизированным гидравлическим тормозным приводом // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. – № 4. – Донецк, – 2013. – С. 89 – 98.

**Bibliography ( transliterated):** 1. Turenko, A. N., and S. N. Shuklinov. "Adaptivnoe tormoznoe upravlenie kolesnyh mashin." *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov*. No. 5(64). 2010. 18–21. Print. 2. Turenko, A. N., S.N. Shuklinov and V. I. Verbickij. "Ocenka ustojchivosti sistemy adaptivnogo upravlenija tormozami." *Sb. nauch. tr. HNADU "Avtomobil'nyj transport."* No. 28. Kharkov. 2011. 7–11. Print. 3. Turenko, A. N., S. N. Shuklinov and N. G. Mihalevich. "Jelektropnevmaticheskij privod tormozov s adaptivnym upravleniem." *Izv. VolgGTU. Ser.: Nazemnye transportnye sistemy*. Vol. 4: mezhvuz. sb. nauch. st. Volgograd: VolgGTU, 2011. No. 12 (85). 51–53. Print. 4. Turenko, A. N., S. N. Shuklinov and N. G. Mihalevich. "Modelirovanie dinamiki kolesnoj mashiny s adaptivnym jelektropnevmaticheskim privodom tormozov." *Vestnik HNADU*. Vol. 56. Kharkov. 2012. 66–74. Print. 5. Shuklinov, S. N. "Modelirovanie processa tormozhenija avtomobilja s adaptivnym chastichno avtomatizirovannym gidravlicheskim tormoznym privodom." *Vestnik Doneckoj akademii avtomobil'nogo transporta*. No. 4. Donetsk. 2013. 89–98. Print.

*Поступила (received) 06.10.2014*