

УДК 629.113

В.Г. Дыгало, В.В. Котов, Л.В. Дыгало, А.А. Ревин

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОРМОЗНОЙ ДИНАМИКИ АВТОМОБИЛЯ С ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ АБС

Волгоградский государственный технический университет

Приводится результат верификации при применении виртуально-физической технологии моделирования для испытания пневматических автоматизированных тормозных систем автомобилей.

Ключевые слова: процесс торможения, верификация, виртуально-физическая технология моделирования, автомобиль, автоматизированная тормозная система.

При проведении испытаний с использованием виртуально-физической технологии моделирования [1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10], возникает вопрос оценки адекватности, т.е. тождественности созданной модели физическому объекту. И для этого применяются различные способы. Так, при создании модели автоматизированной тормозной системы АТС верификацию целесообразно вести, как показывает опыт авторов, в двух аспектах: сопоставлять, как это делается традиционно, не только величины основных моделируемых параметров физического объекта (параметрическая адекватность), но и проверять способность автоматизированной системы управлять логическими операциями при определенных условиях функционирования модели (логическая адекватность) [1, 2, 4, 8, 11].

Основанием для такого подхода служит то обстоятельство, что используемые для оценки нормативные показатели тормозных свойств автомобиля часто базируются на интегральных критериях (например, тормозной путь, установившееся замедление, время нарастания замедления и т.п.). При этом одинаковые величины тормозного пути или установившегося замедления получаются при реализации одной и той же средней величины реализованного сцепления, которое может быть получено при различном состоянии заторможенного колеса, т.е. в достаточно широком диапазоне проскальзывания и, следовательно, при различной настройке АБС или даже юзе колес (АБС не функционирует).

С другой стороны, вследствие флуктуации коэффициента сцепления колеса с опорной поверхностью по мере срабатывания АБС фазы регулирования тормозного момента на колесах автомобиля, как правило, с течением времени расходятся, что уже после нескольких циклов регулирования приводит к существенным параметрическим отклонениям.

В связи с изложенным проверку на адекватность разработанной модели целесообразно проводить по следующей схеме.

Сначала оценивается адекватность воспроизведения физического процесса при выполнении логических операций по принципу «да-нет». При этом задаются тестовые режимы движения автомобиля в процессе торможения: величина давления рабочего тела в приводе или максимальное усилие на тормозной педали; величина коэффициента сцепления пары «шина-дорога»; состояние тормозных механизмов, при котором должна срабатывать (или не срабатывать) антиблокировочная система. Затем осуществляется проверка модели на выдачу соответствующей логической команды на включение (или не включение) АБС. Аналогично осуществляется проверка точки настройки модели на срабатывание и отработка фаз процессов затормаживания, растормаживания и отсечки как на восходящей, так и на нисходящей ветвях.

Для торможения автомобиля с отключенной АБС в условиях характерной для транспортных средств неравномерности действия тормозных механизмов проверка осуществляет-

ся по числу заблокированных в процессе торможения колес, а также оценивается направление смещения центра масс и изменение курсового угла автомобиля. Это позволяет проверить адекватность моделирования тормозных моментов на колесах, т.е. первоисточника возмущения для рассматриваемого движения автомобиля.

После проверки модели на отработку логических операций оценивается адекватность по величинам отклонения параметров. Но поскольку на практике всегда имеет место флуктуация коэффициента сцепления пары «шина–дорога» по пути, то оценку целесообразно проводить как в пределах цикла регулирования тормозного момента (на основе анализа темпов изменения давления рабочего тела или тормозного момента, длительности выдержки, периода регулирования или частоты процесса), так и по традиционным интегральным показателям – величине тормозного пути и установившегося замедления, смещению центра масс в боковом направлении и курсовому углу (как на траектории, так и в конце процесса). С этой целью при экспериментах для регистрации основных параметров в процессе движения авторы использовали гироскопическое устройство, расположенное в центре масс автомобиля, и сопло форсунки, управляемое от задатчика с фиксированной частотой нанесения на поверхность дороги легко смываемой красящей жидкости, датчиков продольного и поперечного ускорений и «пятого колеса».

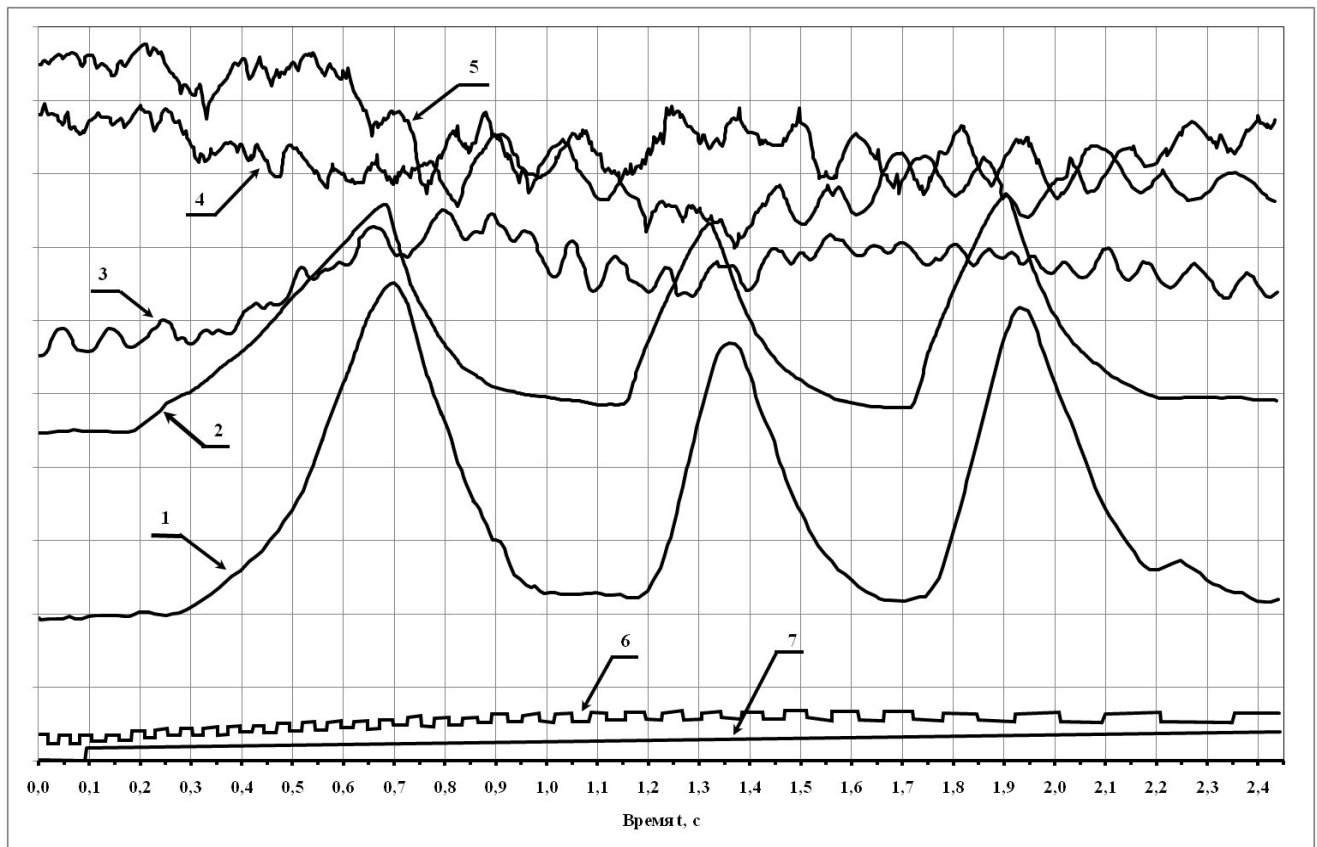


Рис. 1. Динамические характеристики торможения автомобиля $V_0 = 40$ км/ч (дорожный эксперимент):

- 1 – тормозные моменты M_{Tj} на его колесах; 2 – давление P_{TK} рабочего тела в тормозных камерах;
3 – продольное замедление j ; 4, 5 – нормальные нагрузки R_{lj} на колесах правого и левого бортов;
6 – тормозной путь S_T «пятое колесо»; 7 – поперечное смещение $\Delta_{ц.м}$ центра масс

В соответствии с предлагаемым подходом достоверность работы модели в составе комплексной моделирующей установки при использовании АБС сначала проверялась путем

оценки правильности чередования фаз и режимов функционирования моделируемых объектов в заданных эксплуатационных условиях (логическая адекватность). Зафиксированный на установке процесс затормаживания колеса затем сравнивался с таким же процессом, полученным в ходе дорожных испытаний. Такое сравнение касалось срабатывания АБС при заданных сцепных свойствах опорной поверхности, скоростей движения, соответствующих началу торможения и изменению нагрузки, реализуемой на колесе (“да–нет”); отработки фаз регулирования тормозного момента (“затормаживание–растормаживание–отсечка”); воспроизведения характерных участков изменения угловой скорости и ускорения колеса при входе его в юз и разблокировании. В итоге была оценена логическая адекватность самой экспериментальной установки, а затем, анализируя расхождение результатов, полученных на ней и в дорожных условиях, уверенно выполнять и параметрическую адекватность моделей, применяя формулу

$$P_i = \frac{P_{ci} - P_{ди}}{P_{ci}} \cdot 100,$$

где P_i – расхождение при сравнении i -го параметра; P_{ci} – значение i -го параметра, полученное на стенде; $P_{ди}$ – значение того же параметра, но полученное при дорожных испытаниях.

Предлагаемый метод – предельно простой с точки зрения практической его реализации. Дело в том, что сопоставление результатов стендовых и дорожных испытаний в данном случае осуществляется путем наложения друг на друга динамических характеристик процесса затормаживания, полученных для одинаковых начальных условий и выполненных в одном масштабе.

Рассмотрим этот процесс на конкретном примере – для автомобиля КамАЗ-5320.

Работа начинается с дорожного эксперимента, в ходе которого записывается осциллограмма (рис. 1) процесса его торможения [2]. При этом линейная скорость и тормозной путь регистрируются прибором «пятое колесо».

Для верификации на моделирующей установке воспроизводятся именно эти условия соответствующие дорожным испытаниям.

Сопоставление результатов стендовых и дорожных испытаний осуществлялось путем наложения друг на друга динамических характеристик процесса затормаживания полученных для одинаковых начальных условий и выполненных в одном масштабе. Для этого на комплексной моделирующей установке был проведен ряд экспериментов, повторяющих ранее проведенный дорожный эксперимент [2].

На рис. 1, 2 в качестве примера представлены: осциллограмма процесса торможения автомобиля КамАЗ – 5320, полученная в ходе дорожного эксперимента и динамические характеристики торможения автомобиля КамАЗ – 5320 на КМУ.

Основными параметрами, полученными в ходе дорожного эксперимента, являются: тормозные моменты на колесах, давления рабочего тела в тормозных камерах, нормальные нагрузки на колесах правого и левого борта, продольное замедление автомобиля, поперечное смещение центра масс, угол разворота продольной оси автомобиля, тормозной путь и линейная скорость автомобиля. С учетом того факта, что в используемой на КМУ модели расчет ведется для равнозамедленного движения, найдем среднереализованное замедление за период времени, приведенного на осциллограмме дорожного эксперимента (рис. 1).

Линейная скорость и тормозной путь регистрировались прибором “пятое колесо”. Сигнал от бесконтактных фотоэлектрических датчиков расположенных на “пятом колесе”, поступал в пересчетный блок, расположенный в кабине, где формирователь импульсов отправлял сигнал для записи на осциллографическую бумагу, форма которого приведена на осциллограмме дорожного эксперимента, а один оборот колеса соответствует четырем импульсам (рис. 1).

При радиусе "пятого колеса" $r = 0,36$ м, длина окружности – 2,26 м.

Как видно из осциллограммы, за первые 0,1 с колесо делает $\approx 0,5$ оборота, т. е. проходит расстояние $\approx \frac{2,26}{2} = 1,13$ м, следовательно, скорость начала торможения

$$V_0 = 11,3 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 40,7 \frac{\text{км}}{\text{ч}}.$$

Период времени между последними двумя импульсами на осциллограмме $t = 0,17$ с.

За это время "пятое колесо" проходит расстояние 0,28 м и его линейная скорость $V = 1,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Изменение скорости за 1,85с, от первого до последнего импульса на осциллограмме составляет $\Delta V = 11,3 - 1,7 = 9,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Тогда среднереализованное замедление $j_{cp} = \frac{9,6}{1,85} = 5,2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Поэтому для оценки воспроизводимости результатов, полученных на КМУ, рассмотрим динамические характеристики торможения автомобиля КамАЗ – 5320 на сухом асфальтобетоне в снаряженном состоянии (с 10% загрузки, примерно соответствующей весу контрольно-измерительной аппаратуры) с начальной скоростью $V_0 = 40,7 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ при замедлении

$j_{cp} = 5,2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. На рис. 2 показана такая динамическая характеристика. Как видно, при тормо-

жении в данных условиях за первые две секунды процесса происходит 3 цикла трехфазового регулирования тормозного момента. При сопоставлении давления на выходе тормозной камеры и тормозного момента для переднего левого колеса, полученных в дорожном эксперименте и на КМУ (рис. 1, 2), наблюдается качественная воспроизводимость картины процесса, с одинаковым числом циклов и с разницей частоты регулирования не превышающей 4%. Что касается темпов нарастания и сброса, в первом цикле регулирования, углы наклона кривых изменения давления и тормозного момента, полученных в разных условиях, практически совпадают, а отличие по времени, как для фазы нарастания, так и для фазы сброса, не превышает 0,05с. В последующих циклах регулирования наблюдается более существенная разница в темпах нарастания и сброса и в амплитудах колебания особенно для кривой изменения тормозного момента. Это различие обусловлено тем, что в ходе дорожных испытаний на изменение нормальной нагрузки на колесе в процессе торможения влияет не только изменение дифферента кузова и микронеровностей поверхности по пути (учтено в модели), но и явления колебания мостов автомобиля в продольном направлении вследствие выявленного эффекта галлопирования [2].

Такая характеристика приведена на рис. 2. Как из нее видно, за первые 2 с торможения в данных условиях происходит три цикла трехфазового регулирования тормозного момента. При сопоставлении давления $P_{\text{тк}}$ на выходе тормозной камеры и тормозного момента $M_{\text{тн}}$ для переднего левого колеса, полученных в дорожном эксперименте (см. рис. 1) и на моделирующей установке (см. рис. 2), очень четко наблюдается качественная воспроизводимость картины процесса – с одинаковым числом циклов и с разницей частоты регулирования, не превышающей 4 %.

Что же касается темпов нарастания и сброса давления в первом цикле регулирования, то углы наклона кривых изменения его и тормозного момента, полученные в разных (на установке и дороге) условиях, практически совпадают, а отличие по времени как для фазы нарастания, так и для фазы сброса не превышает 0,05 с.

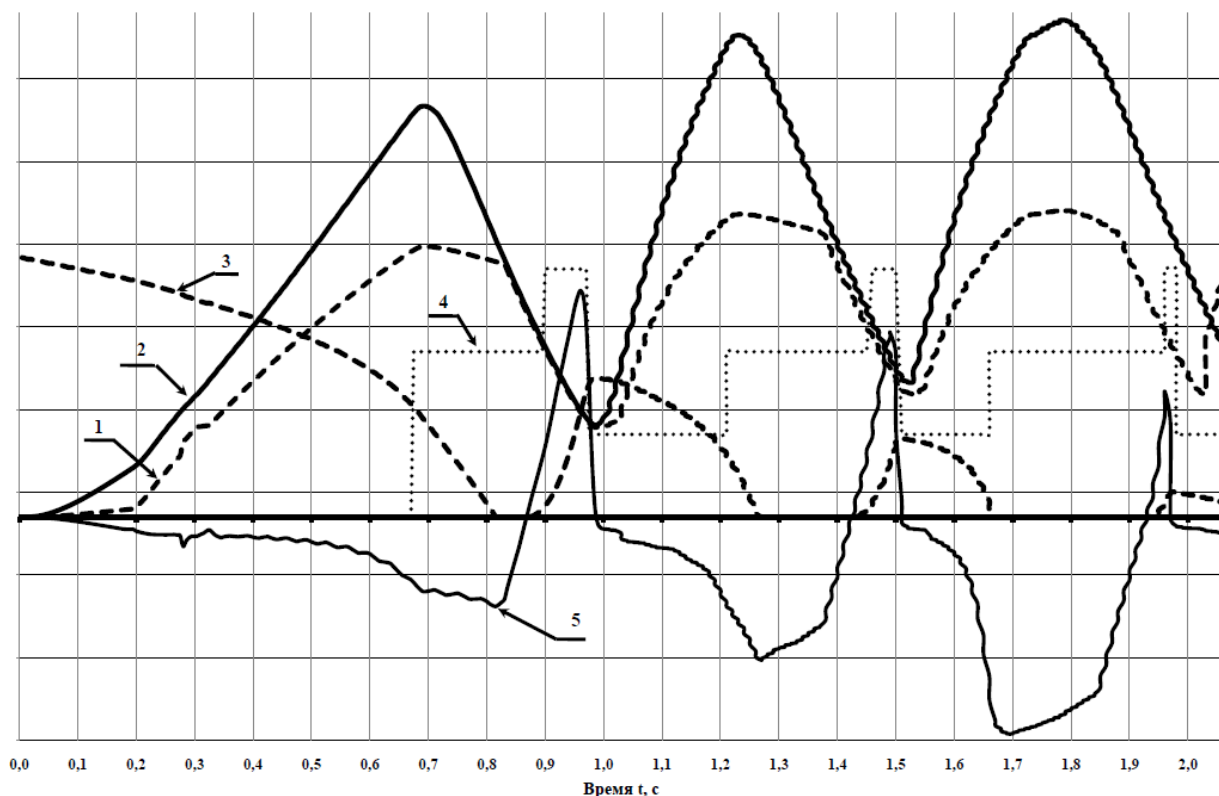


Рис. 2. Динамические характеристики торможения автомобиля $V_0 = 40$ км/ч (моделирование):

- 1 – тормозные моменты M_T на его колесах; 2 – давление $P_{\text{тк}}$ рабочего тела в тормозных камерах;
3 – продольное замедление j ; 4 – фазы работы АБС; 5 – нормальная нагрузка $R_{\text{л}}$ на колесе

Однако в последующих циклах регулирования разница в темпах нарастания и сброса и в амплитудах колебания, особенно для кривой изменения тормозного момента, становится более существенной. Ее причина состоит в том, что в ходе дорожных испытаний на изменение нормальной нагрузки на колесе в процессе торможения влияет не только изменение дифферента кузова и микронеровностей поверхности по пути (что в модели учтено), но и колебания мостов автомобиля в продольном направлении (эффект галлопирования).

Результаты верификации полученных на стенде динамических характеристик процесса затормаживания и конечных величин интегральных параметров, в том числе периода $t_{\text{дф}}$ динамической фазы и частоты $F_{\text{АБС}}$ функционирования АБС, с характеристиками, полученными дорожным экспериментом для торможения КамАЗ-5320 на сухом асфальтобетоне [2], приведены в табл. 1.

Таблица 1

Конечные значения параметров процесса затормаживания колеса

Параметр получен	$P_{\text{тк max}}$, МПа (кгс/см ²)	$M_T \text{ max}$, кН·м	Амплитуда $P_{\text{тк}}$, МПа (кгс/см ²)	Амплитуда M_T , кН·м	$F_{\text{АБС}}$, Гц	Период динамической фазы, с
На стенде	0,6 (6,0)	7,36	0,49 (4,9)	5,35	1,90	0,72
Экспериментально	0,5 (5,2)	6,430	0,44 (4,4)	6,43	1,83	0,78
Погрешность, %	13,4	13,6	10,2	16,8	3,7	7,7

Аналогичные работы были проведены и для других вариантов опорных поверхностей (сухой и мокрый асфальтобетон) и загрузки автомобиля КамАЗ-5320 [2] (снаряженное состояние и максимальная загрузка). Оказалось, что разница между результатами дорожных испытаний и проверки на моделирующей установке во всех случаях не выходит за пределы 4–15 %. Это свидетельствует о том, что использование в установке реальных тормозного привода и узлов АБС [1, 2, 10, 12, 13] позволяет получить хорошую сходимость расчетных значений параметров с результатами эксперимента и полностью отражает физическую картину процесса затормаживания колеса. Другими словами, виртуально-физическое моделирование [1, 3] может эффективно применяться для решения различных функциональных задач как при проектировании тормозной системы, так и для задач эксплуатационного характера. Например, для исследования влияния неисправностей тормозной системы с АБС на рабочий процесс затормаживания колеса с целью выявления диагностических признаков этой системы [12, 13].

Библиографический список

1. **Дыгало, В.Г.** Виртуально-физическая технология лабораторных испытаний систем активной безопасности автотранспортных средств: монография / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин; ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – 316 с.
2. **Ревин, А.А.** Теория эксплуатационных свойств автомобилей и автопоездов с АБС в режиме торможения: монография / А.А. Ревин; ВолгГТУ. – Волгоград: РПК "Политехник", 2002. – 372 с.
3. **Ревин, А.А.** Комплексное моделирование в цикле проектирования автомобилей и их систем / А.А. Ревин, В.Г. Дыгало // Автомобильная промышленность. 2002. №11. С. 29–30.
4. **Шадрин, С.С.** Возможности использования бортовых сетей передачи данных автотранспортных средств в задачах интеллектуальных транспортных систем / С.С. Шадрин, А.М. Иванов // Автотранспортное предприятие. 2014. № 5. С. 43–46.
5. **Дыгало, В.Г.** Виртуально-физические технологии испытаний для проектирования автоматизированных тормозных систем / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Машиностроение & электротехника (Болгария). 2005. №5. С. 26–29.
6. **Костин, С.Ю.** Исследование активной безопасности транспортных средств методом имитационного моделирования / С.Ю. Костин, В.Г. Дыгало // Безопасность транспортных средств в эксплуатации : матер. 71-й междунар. науч.-техн. конф. (12-13 окт. 2010 г.) / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2010. С. 17–19.
7. **Дыгало, В.Г.** Виртуально-физическая технология моделирования систем активной безопасности / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Труды Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород. 2011. № 3. С. 146–155.
8. **Тумасов, А.В.** Исследование свойств активной безопасности транспортных средств методом имитационного моделирования / А.В. Тумасов [и др.] // Журнал автомобильных инженеров. 2011. № 2. С. 34–37.
9. **Дыгало, В.Г.** Применение виртуально-физической технологии моделирования для проектирования систем активной безопасности / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Безопасность транспортных средств в эксплуатации : сб. матер. 79-й междунар. науч.-техн. конф. (3-4 окт. 2012 г.), посвящ. 95-летию НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2012. С. 55–62.
10. **Дыгало, В.Г.** Технологии испытания систем активной безопасности автотранспортных средств : монография / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин. – М. : Машиностроение, 2012. – 387 с.
11. **Дыгало, В.Г.** Принципы синтеза виртуально-физических моделей, предназначенных для разработки тормозной системы автомобиля с АБС / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Автомобильная промышленность. 2014. № 8. С. 17–19.
12. **Комплекс для диагностики систем активной безопасности автомобиля / Г.О. Мельников, Е.С. Ларин, В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Известия ВолгГТУ. Серия "Наземные транспортные системы": межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. Вып. 6. № 10 (113). С. 102–105.**

13. Компьютерный метод диагностики систем активной безопасности автомобиля. Диагностика ABS и ESP / Г.О. Мельников, Е.С. Ларин, А.А. Ревин, В.Г. Дыгало // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований = Topical areas of fundamental and applied research : матер. междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 4-5 марта 2013 г.). V. 2 / spc Academic. – North Charleston, (SC, USA), 2013. С. 81–85.

*Дата поступления
в редакцию 20.09.2014*

V.G. Dygalo, V.V. Kotov, L.V. Dygalo, A.A. Revin

**VERIFICATION IN THE PROCESS OF MODELING BRAKE DYNAMICS
VEHICLE WITH PNEUMATICS ABS**

Volgograd state technical university

Purpose: In the papers verification in use virtually-physical technology method modeling in the process develop and test automated breaking system vehicles is described.

Design/methodology/approach: The simulation study based virtually-physical technology method modeling in the process develop and test automated breaking system.

Findings: It is possible to apply the research results for estimation of breaking condition on the basis of simulation results that shows high convergence with experimental data.

Originality/value: The main peculiarity is original approach use virtually-physical technology method modeling that could have a good practical application.

Key words: virtually-physical technology modeling, vehicles, automated breaking system, verification.