

тельности получены с применением условий Коши – Римана. Для определения корневой чувствительности строится корневой годограф системы, в заданных точках которого в соответствии с алгоритмом вычисляются значения λ и γ . На основе указанного алгоритма разработана компьютерная программа (язык программирования C++) вычисления функции корневой чувствительности. Приведен пример автоматизированного вычисления корневой чувствительности для следящей системы. Разработанный алгоритм определения функции корневой чувствительности отличается тем, что в его основу положены аналитические уравнения корневых годографов, обеспечивающие простоту реализации алгоритма и наглядность. Алгоритм может быть практически использован в системах автоматизированного проектирования САУ (САПР САУ) при решении задач анализа и синтеза систем для оценки отклонений корней системы (изменения хода процесса управления), вызванных параметрическими вариациями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляк, Б. Т. Робастная устойчивость и управление / Б. Т. Поляк, П. С. Щербаков. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
2. Боде, Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью / Г. Боде. – М.: Гос. изд-во иностр. лит., 1948. – 642 с.
3. Цыпкин, Я. З. Теория релейных систем автоматического регулирования / Я. З. Цыпкин. – М.: Гостехиздат, 1955. – 456 с.
4. Huang, J. G. The sensitivity of the poles of linear closed-loop systems / J. G. Huang // Trans AIEE. – 1958. – Vol. 77. – P. 150–156.
5. Римский, Г. В. Автоматизация исследований динамических систем / Г. В. Римский, В. В. Таборовец. – Минск: Наука и техника, 1978. – 336 с.
6. Eslami, M. Theory of Sensitivity in Dynamic Systems / M. Eslami. – N.Y.: Springer-Verlag, 1994. – 600 p.
7. Несенчук, А. А. Анализ и синтез робастных динамических систем на основе корневого подхода / А. А. Несенчук. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2005. – 234 с.
8. Лаврентьев, М. А. Методы теории функций комплексного переменного / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М.: Наука, 1987. – 688 с.
9. Удерман, Э. Г. Метод корневого годографа в теории автоматического управления / Э. Г. Удерман. – М.: Наука, 1972. – 448 с.

Поступила 30.05.2008

УДК 629.067

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С АНТИБЛОКИРОВОЧНЫМИ И ПРОТИВОБУКСОВОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ

*Канд. техн. наук, доц. ГУРСКИЙ Н. Н., СЛАБКО Ю. И.,
докт. техн. наук, проф. ФУРУНЖИЕВ Р. И., канд. техн. наук, доц. ХОМИЧ А. Л.*

Белорусский национальный технический университет

Для обеспечения устойчивости и управляемости движения транспортных средств (автомобилей, самолетов, многоопорных колесных шасси и др.) в любых дорожных и погодных условиях независимо от квалификации и состояния водителя (пилота, механика-водителя), машины и внешней среды предназначены системы активной безопасности (САБ). Подсистемами САБ являются системы антиблокировочные (АБС) и противобуксовочные системы (ПБС). Совершенствование качества работы

и снижение стоимости САБ является актуальной проблемой.

Эффективность САБ определяется алгоритмами управления и свойствами используемых силовых исполнительных приводов. В [1] приведен обзор конструкций антиблокировочных и противобуксовочных систем различных фирм, даны характеристики элементов, а также описаны алгоритмы их работы. В [2] приведены теория и результаты исследования эффективности антиблокировочной системы грузовых автотранспортных средств.

В [3] рассмотрен комплекс вопросов по автоматизации процесса торможения автомобиля. В [4] приведен обзор конструкций антиблокировочных и противобуксовочных систем легковых автомобилей. В [5] рассмотрена специфика использования микрокомпьютеров для управления АБС и ПБС.

По проблеме активной безопасности автомобилей имеется большое количество патентов, которые рассматривают САБ кинематического типа. В [6, 7] коэффициенты сцепления колес с дорогой $\mu_{il}(K)$, $i = 1, \dots, n$; $l = 1, 2$, характеризующие состояние системы «дорога – шина – автомобиль», рассчитываются в последовательные моменты времени $(T - 1)$, T , $(T + 1)$, ..., на основании измеренных величин угловых скоростей колес ω_{il} , расчетной курсовой скорости машины, тормозного давления и некоторых других величин, с помощью различных уравнений и алгоритмов идентификации. Полученные таким образом коэффициенты сцепления $\mu_{il}(K)$ используются для определения наклона $K_{\mu il}$ кривых $\mu - s$: $K_{\mu il} = d\mu_{il}/ds_{il}$, которые в свою очередь используются для оптимального управления угловой скоростью каждого колеса.

Для дальнейшего повышения качества функционирования САБ предложен силовой подход к ее созданию [8]. В САБ нового типа используются фактически реализуемые в контакте пневматика с дорогой продольные/поперечные силы/моменты (или их производные).

Способ адаптивного управления свойствами движения транспортных средств, оснащенных САБ как нового поколения на основе силовых факторов, так и классического типа, разработан и описан в патенте [9]. В [10] задача управления САБ сформулирована как нестационарная задача автоматического управления, описаны теоретические основы синтеза алгоритмов управления на основе концепций решения обратных задач динамики управляемых систем, а также приведены синтезированные управления в зависимости от фазовых координат управляемой системы, т. е. в форме регуляторов.

Обзор принципов работы и конструкций известных систем активной безопасности легковых и грузовых автомобилей широко представлен в справочнике [11], созданном специалистами компании Bosch. Динамика автомобилей

семейства «МАЗ» с АБС классического типа рассмотрена в [12]. Сравнительный анализ качества работы ABS/EBS приведен в [13].

В [14] рассмотрены теория, свойства и технические решения автоматизированных тормозных систем, а в [15] – теория эксплуатационных свойств и компьютерное моделирование динамики движения автомобилей и автопоездов с АБС классического типа.

Существенному развитию теории и практики САБ нового поколения способствовали создание адаптивных регуляторов [16, 17].

Силовой принцип создания САБ получил дальнейшее развитие в виде алгоритмов и устройств управления в патентах [18–24 и др.]. В [25] приведены конструкции датчиков для измерения сил и моментов, фактически реализуемых в контакте колеса с дорогой, конструкции тормозных механизмов и некоторые эвристические приемы регулирования режимов движения мобильных машин на основе измерений сил и моментов.

В [26, 27] рассмотрены методы идентификации, управления и компьютерного моделирования интеллектуальных САБ. В результате анализа известных работ [14, 15] были установлены характеристики нарастания и спада тормозного давления в приводе, поведение коэффициента сцепления в продольном и поперечном направлениях, изменения коэффициентов скольжений колес, угловых скоростей и замедлений колес, закономерность поведения фактической силы и ее производной в контакте «колесо – дорога» для различных типов дорог и их состояний.

При моделировании изменение фактических сил/моментов $x(t)$ в контакте колес с дорогой нарастание/убывание силы в тормозном приводе, а также изменение коэффициента сцепления в продольном направлении могут быть описаны функциями вида:

$x(t) = c \exp^{-at^2}$ – при убывании величины $x(t)$;

$x(t) = c(1 - \exp^{-at^2})$ – при возрастании величины $x(t)$,

где $a = (t_{pp}, \varphi)$ – параметр, зависящий от времени переходного процесса t_{pp} и максимального коэффициента сцепления в продольном направлении

φ ; c – некоторая константа, соответствующая максимальному значению при возрастании функции $x(t)$ и снижении значения функции $x(t)$ на величину c за время переходного процесса t_{pp} .

Результаты компьютерного моделирования тормозной динамики легкового автомобиля без АБС представлены на рис. 1, а с АБС – на рис. 2.

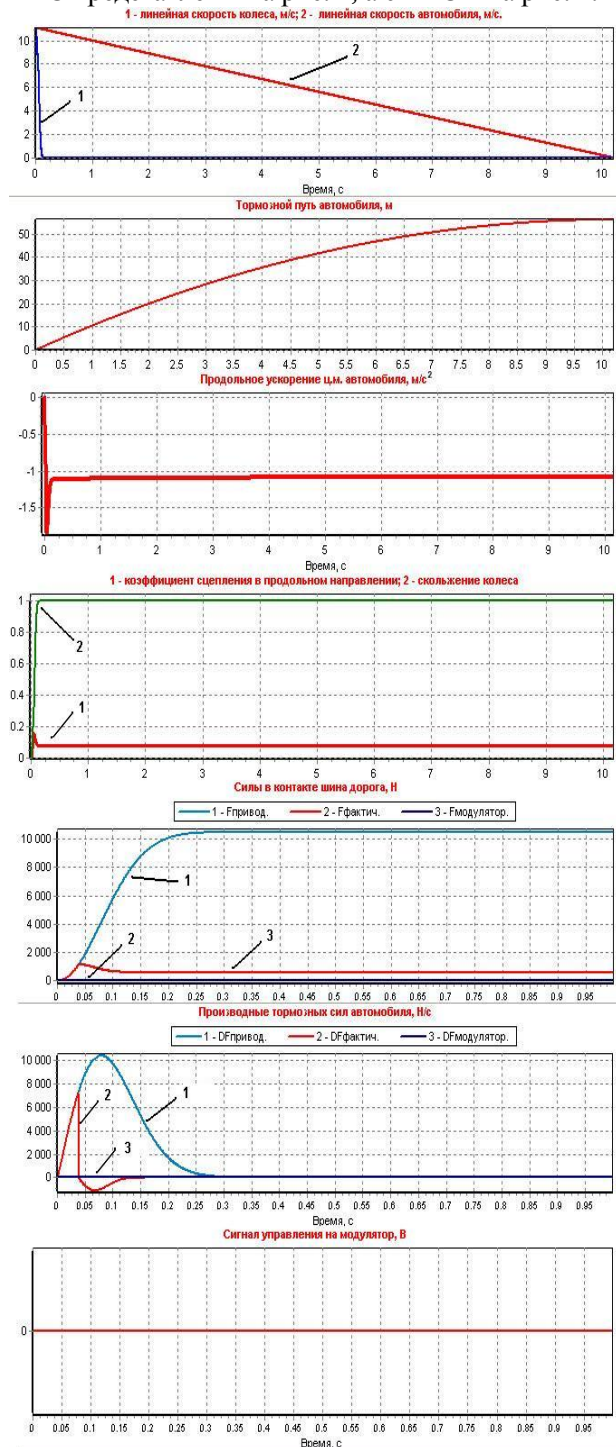


Рис. 1. Переходные процессы при торможении ТС без АБС, начальная скорость движения $v_0 = 40$ км/ч (11,11 м/с)

Из рис. 1 видно, что тормозной путь автомобиля без АБС составил 56,89 м, установившееся замедление – $1,1 m/s^2$. Из рис. 2 очевидно, что тормозной путь автомобиля с АБС нового поколения составил 34,81 м и сократился на 22,09 м, что на 40 % меньше, чем при торможении без АБС, установившееся замедление равно $1,8 m/s^2$. При этом продольные коэффициенты скольжения колес находились в «устойчивой» области кривой «коэффициент сцепления – скольжение» и составляли 18–20 % скольжения колеса, обеспечивая тем самым максимум коэффициента сцепления в продольном направлении.

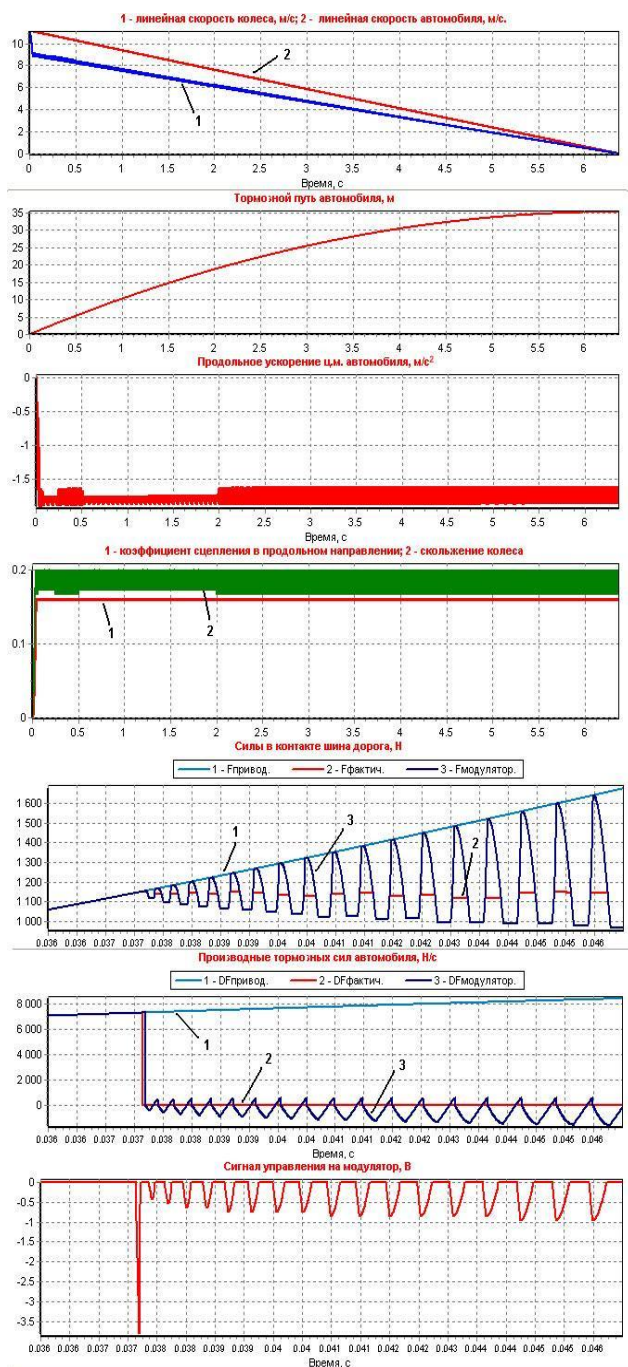


Рис. 2. Переходные процессы при торможении транспортного средства с АБС; быстродействие двухпозиционного модулятора $t_m = 50$ мкс

Как видно из рис. 2 и 3, при увеличении быстродействия модулятора в 2 раза тормозной путь составляет 33,55 м и сокращается на 3,6 % за счет более эффективной работы системы в области экстремума кривой «коэффициент сцепления – скольжения», установившееся замедление уменьшилось на $0,05 \text{ м/с}^2$. Обеспечивается поддержание продольного коэффициента сцепления в диапазоне 19–20 % скольжения

колеса. При этом также обеспечиваются более высокое среднее значение поперечного коэффициента сцепления.

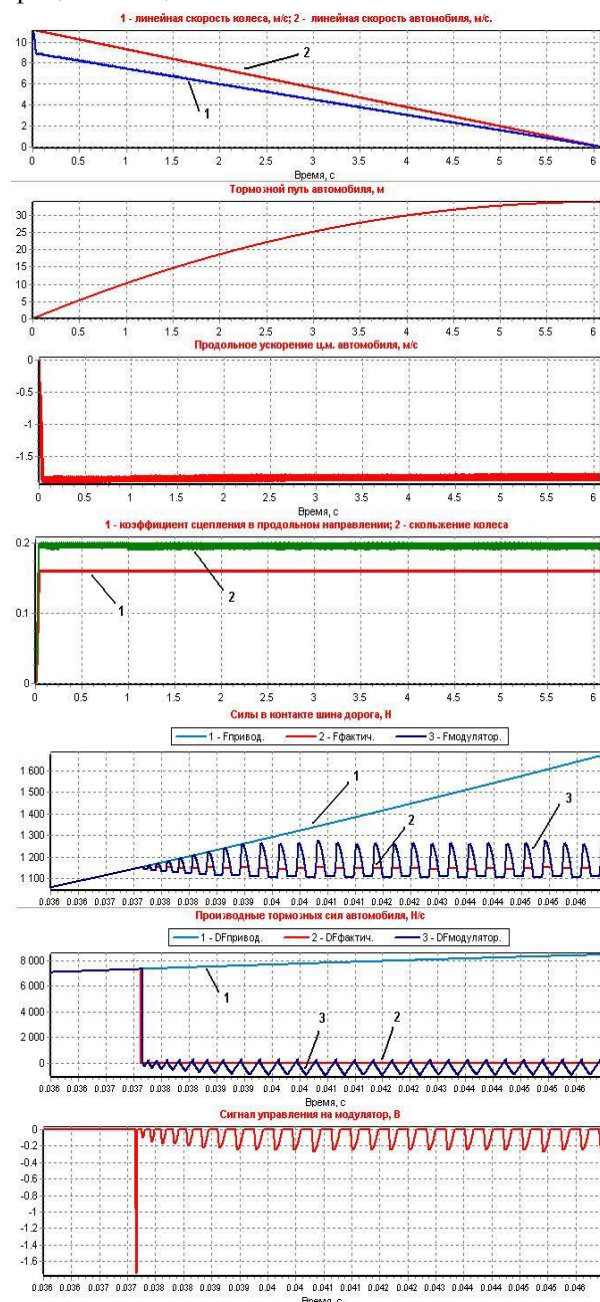


Рис. 3. Переходные процессы при торможении ТС с АБС; быстродействие двухпозиционного модулятора $t_m = 25$ мкс

ВЫВОД

Разработана математическая модель пространственного движения транспортного средства с САБ, и произведен анализ влияния отдельных параметров исполнительного привода на эффективность торможения при обеспечении устойчивости его движения. Результаты компьютерного моделирования показали высо-

кую эффективность работы АБС/ПБС нового типа по всем оценочным показателям: тормозной путь, величины продольного и поперечного замедления, исключение блокирования колес. Созданные математические и программные средства виртуального проектирования позволяют сократить сроки и стоимость проектирования, повысить качество принимаемых решений при создании АБС/ПБС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Нефедьев, Я. Н.** Конструкции и характеристики электронных антиблокировочных систем: обзорная информация / Я. Н. Нефедьев. – М.: ЦНИИТЭИ Автопром, 1979. – 60 с.
2. **Нефедьев, Я. Н.** Теория, разработка и исследование унифицированной системы автоматического управления антиблокировочным торможением грузовых автомобилей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 / Я. Н. Нефедьев. – М., 1987. – 307 с.
3. **Ломако, С. И.** Автоматизация процесса торможения автомобиля: уч. пособие / С. И. Ломако, Е. М. Гецович. – Киев: УМК ВО, 1988. – 88 с.
4. **Фрумкин, А. К.** Антиблокировочные и противобуксовочные системы легковых автомобилей: обзорная информация / А. К. Фрумкин, И. И. Алышев, А. И. Попов. – М.: ЦНИИТЭИ Автопром, 1989. – 52 с.
5. **Автоэлектроника** за рубежом: инф. сб. – М.: НПО «Автоэлектроника», 1992. – Вып. 1. – 124 с.
6. **Method to Control the Operation of Wheels of a Vehicle to Prevent Slipping or Skidding, and Brake Locking:** Pat. USA 4,794,538 Dec. 27, 1988.
7. **Cao Chi-Thuan.** An Automatic Control System for Antilocking and Antiskid Applications: Pat. USA 5,135,290 Aug. 4, 1992 and DE-OS 35 35 843.
8. **Противоблокировочная** тормозная система транспортного средства: пат. 1408 Респ. Беларусь / Р. И. Фурунжиев, В. А. Ким; заявл. 01.07.1993.
9. **Способ** Фурунжиева управления движением транспортного средства: пат. 5182 Респ. Беларусь / Р. И. Фурунжиев; заявл. 10.03.1999.
10. **Фурунжиев, Р. И.** Методы, алгоритмы и программы управления движением в системах мобильных машин / Р. И. Фурунжиев, А. Л. Хомич // Механика машин на пороге III десятилетия: материалы междунар. науч. конф.: – Минск: НИРУП «Белавтотракторостроение», 2001. – С. 282–291.
11. **Автомобильный** справочник; пер. с англ. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2002. – 896 с.
12. **Активная** безопасность автомобиля / В. Г. Бутылин [и др.]. – Минск: НИРУП «Белавтотракторостроение», 2002. – 183 с.
13. **Ракомсин, А. П.** Коэффициент качества работы ABS/EBD / А. П. Ракомсин, В. В. Корсаков, Н. Г. Мальцев // Автомобильная промышленность. – 2002. – № 4. – С. 17–18.
14. **Ревин, А. А.** Автомобильные автоматизированные тормозные системы: техническое решение, теория, свойства / А. А. Ревин. – Волгоград: Изд-во Ин-та качеств, 2002. – 320 с.
15. **Ревин, А. А.** Теория эксплуатационных свойств автомобилей и автопоездов с АБС в режиме торможения / А. А. Ревин. – Волгоград: РПМ «Политехник», 2002. – 372 с.
16. **Регулятор** Фурунжиева: пат. 3160 Респ. Беларусь / Р. И. Фурунжиев; заявл. 19.04.1996.
17. **Способ** и регулятор для управления системами: пат. 2153697 Респ. Беларусь / Р. И. Фурунжиев; заявл. 24.04.1997.
18. **Способ** управления антиблокировочной системой торможения транспортного средства: пат. 2103191 Респ. Беларусь / Р. И. Фурунжиев [и др.]; заявл. 01.07.1993.
19. **Стенд** для испытаний транспортных средств: пат. 1903 Респ. Беларусь / Р. И. Фурунжиев, В. А. Ким; заявл. 30.07.1994.
20. **Противоблокировочное** устройство транспортного средства: пат. 1415 Респ. Беларусь / Р. И. Фурунжиев [и др.]; заявл. 16.02.1995.
21. **Pat. Cooperation Treaty (PCT/BY 96/00005).** 1211 Geneva 20, Switzerland. Способ управления антиблокировочной системой торможения транспортного средства / Р. И. Фурунжиев [и др.]; заявл. 03.07.1996.
22. **Устройство** управления процессом торможения транспортного средства: пат. 2695 Респ. Беларусь / Р. И. Фурунжиев [и др.]; заявл. 7.02.1996.
23. **Способ** управления антиблокировочной системой торможения транспортного средства: пат. 2103191 Респ. Беларусь / Р. И. Фурунжиев [и др.]; заявл. 03.09.1996.
24. **Устройство** измерения тормозного момента: пат. 2131365 Респ. Беларусь / Р. И. Фурунжиев [и др.]; заявл. 13.06.1997.
25. **Ким, В. А.** Методология создания систем активной безопасности автотранспортных средств на основе анализа сил / В. А. Ким. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2003. – 320 с.
26. **Fourounjiev, R.** New Conception and Method of Identification and Control of the Intelligent Vehicle Safety Systems / R. Fourounjiev, Y. Slabko // Vibroengineering-2006: 6th International conference / Kaunas University of Technology. – Lithuania: Technologija, 2006. – P. 173–178.
27. **Fourounjiev, R.** Computer-aided Modeling of the Adaptive Intelligent Vehicle Safety Systems / R. Fourounjiev, Y. Slabko // Mechatronic Systems and Materials (MSM-2007): 3rd International conference 27–29 september, 2007, Kaunas. – Lithuania, 2007. – P. 139–140.

Поступила 24.04.2008

УДК 621.034

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ