

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ВИРТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНТИБЛОКИРОВОЧНЫХ И ПРОТИВОБУКСОВОЧНЫХ СИСТЕМ

*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

Системы активной безопасности (САБ) движения транспортных средств (автомобилей, самолетов и др.) являются фундаментальными средствами повышения устойчивости, управляемости, эффективности торможения/разгона и других их качеств. Ряд актуальных вопросов создания САБ транспортных средств (ТС) рассмотрены в [1–8]. Новый принцип работы АБС/ПБС на силовом принципе предложен в [2]. Алгоритмы адаптивного управления рассмотрены в [2, 3]. Способ управления свойствами движения транспортных средств с интегрированной системой управления свойствами движения описан в патенте [4]. В [5] рассмотрены критерии качества, методы и алгоритмы управления движением в системах мобильных машин в общем случае; в [6] – теория эксплуатационных свойств автомобилей и автопоездов с АБС классического типа в режиме торможения. Концепция и алгоритмы идентификации чрезвычайных ситуаций при движении ТС предложены в [7, 8]. В настоящей работе впервые представлены результаты компьютерного моделирования САБ нового поколения.

При виртуальном проектировании САБ ТС необходимо моделировать тип и свойства покрытия под различными колесами ТС и возникающие в контакте системы «дорога – колесо – ТС» фактические силы/моменты и/или их производные. При моделировании динамики ТС используется пространственная математическая модель движения, предусматривающая возможность задания разных типов дорожного покрытия для колес различных бортов, например

«микст», или различных комбинаций типов, чередуя их как по бортам, так и с одного борта, а также возможность вариации коэффициентов сцепления для различных типов покрытий.

Нами разработан виртуальный полигон, включающий модуль «Редактор дорожного участка» (далее – редактор). В редакторе задается поверхность прямоугольной формы размером $l \times h$ м, где l – длина, h – ширина дорожного участка, состоящая из квадратных ячеек произвольного размера a , с различным типом дорожного покрытия. В программном модуле определены основные типы дорожного покрытия: сухой/мокрый асфальт, сухая/мокрая грунтовая дорога, песок, укатанный/неукатанный снег, лед и др.

Для каждого типа дорожного покрытия необходимо задать цвет покрытия, внешний вид которого будет отображен при проектировании полигона, максимальное значение коэффициентов продольного и поперечного сцеплений и их значения при полном скольжении колес, а также коэффициент сопротивления качению колес f_s . На рис. 1 показаны интерфейс для задания параметров полигона и форма для изменения коэффициентов сцепления в продольном и поперечном направлениях для выбранного (текущего) дорожного покрытия.

После создания любого вида дорожного покрытия его можно сохранить в бинарный файл на любой носитель информации, что позволяет, создав тип покрытия однажды, использовать его в любом другом программном обеспечении, которое поддерживает формат файла с сохра-

ненным типом покрытия. Сохраненный тип покрытия можно отредактировать: для любого типа покрытия можно изменить коэффициенты сцепления в продольном и поперечном направлениях, коэффициент сопротивления среды, а также изменить цвет. Сохраненное дорожное

покрытие используется в программном модуле виртуального проектирования САБ ТС.

На рис. 2 приведена форма трехмерной визуализации динамики движения ТС с использованием покрытия, спроектированного в «Редакторе».

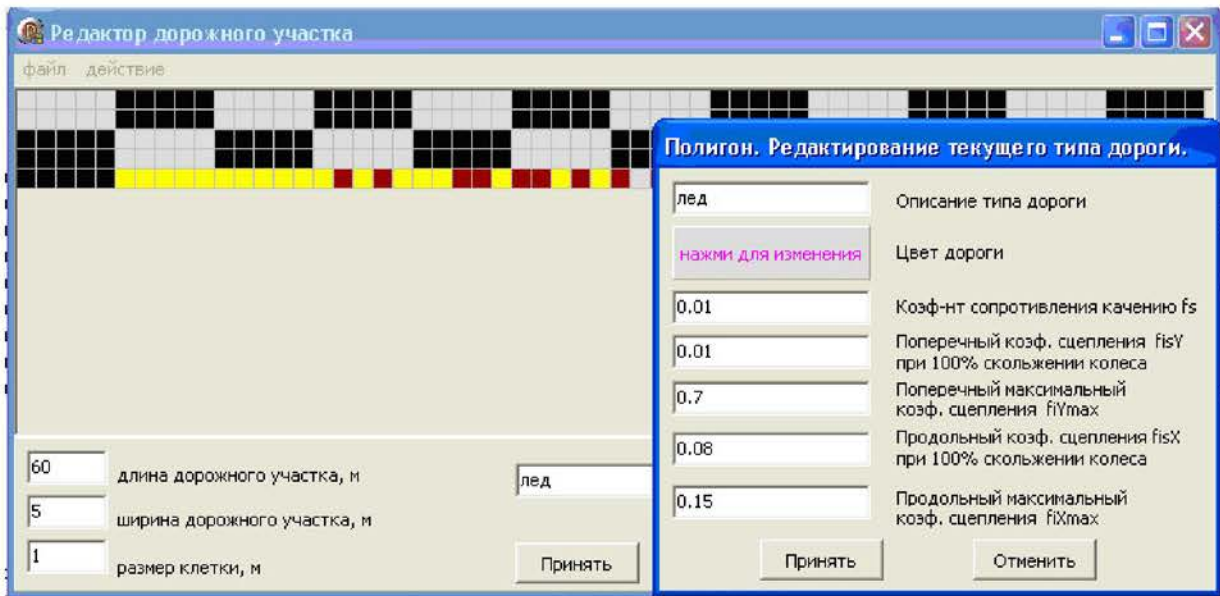


Рис. 1. Интерфейс модуля «Редактор дорожного участка»

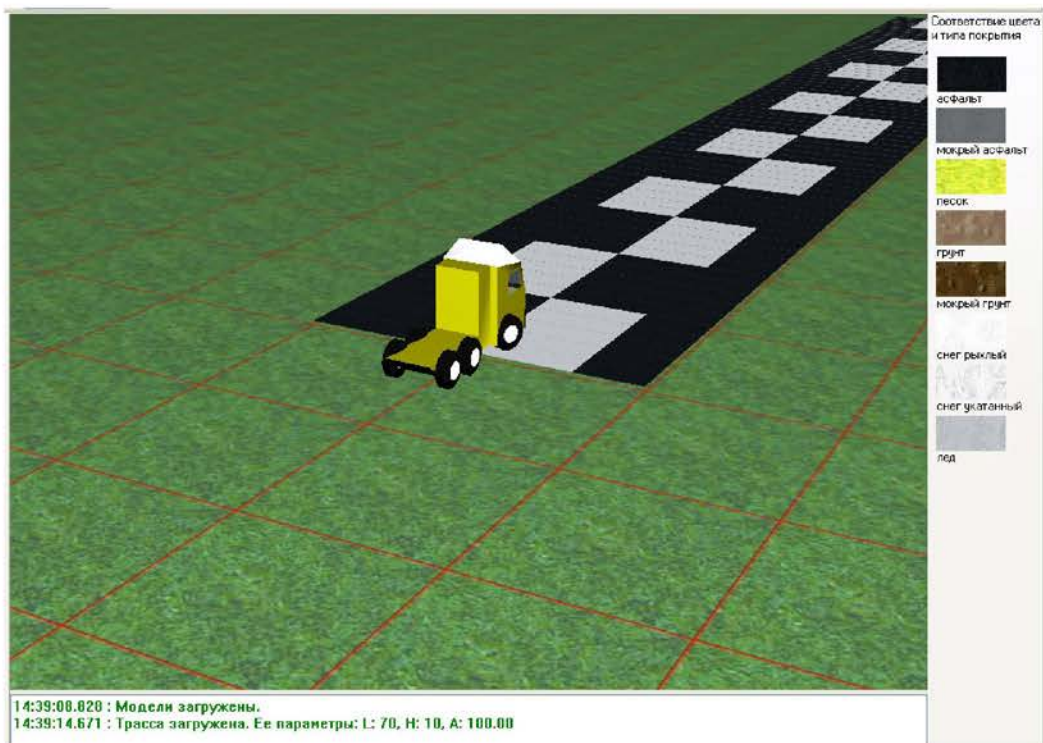


Рис. 2. Трехмерная визуализация движения машины

Для компьютерного моделирования динамики ТС с САБ нового поколения необходимо разработать алгоритм формирования фактических сил/моментов и/или их производных в контакте колес с опорной поверхностью. Анализ [6] позволил выявить тенденцию изменения фактической силы и ее производной в контакте системы «дорога – колесо – ТС» в различных ситуациях.

Рассмотрим переходные процессы для фактических тормозных сил и их производных при моделировании движения ТС без АБС/ПБС в режиме разгона и экстренного торможения. Данный процесс состоит из двух фаз.

Первая фаза начинается в момент начала торможения/разгона и длится до того момента, когда тормозная/тяговая сила станет больше максимально реализуемой силы на колесе. Этот момент соответствует переходу скольжения колеса из устойчивого диапазона в неустойчивый. При этом коэффициент сцепления в продольном направлении переходит через экстремум на кривой «коэффициент сцепления-скольжения колеса».

Вторая фаза начинается после перехода скольжения шины в неустойчивый диапазон скольжения и заканчивается при полной остановке ТС или в тот момент, когда тяговый момент на колесе становится меньше максимально реализуемого момента в контакте «дорога – колесо».

Проведенные исследования показали, что фактические реализуемые в контакте колес процессы могут быть аппроксимированы решением дифференциального уравнения первого порядка

$$\dot{x} + 2atx = 0$$

с начальными условиями: $t \geq t_0 : x(t_0) = x_0$, где x_0 – значение переменной $x(t)$, определяемое моментом времени t_0 , соответствующим наступлению «чрезвычайного события»; $a = a(t_{pp}, \varphi_x)$ – параметр, идентифицируемый по экспериментальным данным; t_{pp} – время переходного процесса изменения фактической силы для определенного типа дорожного покрытия; $\varphi_x(t)$ – текущая величина коэффициента сцепления в продольном направлении.

Решение этого уравнения имеет вид

$$x(t) = x_0 e^{-at^2}.$$

Нетрудно видеть, что процесс $x(t)$ резко убывает с ростом t .

В общем случае рассматривается дифференциальное уравнение с правой частью

$$\dot{x} + 2atx = 2at\bar{x} \tag{1}$$

с начальными условиями $t \geq t_0 : x(t_0) = x_0$, где \bar{x} – заданная «командная» величина.

Представим (1) в виде

$$\dot{x} = 2at(\bar{x} - x). \tag{2}$$

Решением (2) является функция

$$x(t) = x_0 + \bar{x}(1 - e^{-at^2}). \tag{3}$$

Используя (3), изменение фактических сил/моментов $F_f(t)$, их производных $\dot{F}_f(t)$, а также коэффициента сцепления $\varphi_x(t)$ для двухфазного процесса может быть описано следующим алгоритмом:

$$\left. \begin{cases} F_f(t_i) = F_i(t_i); \\ \dot{F}_f(t_i) = \dot{F}_i(t_i); \\ \varphi_x(t_i) = \varphi_{x\max} \left(1 - \frac{F_f(t_i)}{\varphi_{x\max} R_z} \right), \end{cases} \right\} \text{если } F_i(t) \leq \varphi_{x\max} R_z; \tag{4}$$

$$\left. \begin{cases} F_f(t_i) = R_z \varphi_{x\max} - R_z (\varphi_{x\max} - \varphi_{x\min}) e^{-at_i^2}; \\ \dot{F}_f(t_i) = 0 - \dot{F}_{\max} at_i e^{-at_i^2}; \\ \varphi_x(t_i) = \varphi_{x\max} - (\varphi_{x\max} - \varphi_{x\min})(1 - e^{-at_i^2}), \\ i = \overline{0, \dots, n}, \end{cases} \right\} \text{если } F_i(t) \geq \varphi_{x\max} R_z,$$

где $F_t(t)$ – тормозная/тяговая сила/момент на колесе; $R_z(t)$ – нормальная реакция на колесе; φ_{\max} – максимальное значение продольного/поперечного коэффициента сцепления (на кривой «коэффициент сцепления-скольжения колеса»); φ_{\min} – максимальное значение продольного коэффициента сцепления при 100%-м скольжении колеса для текущего типа дорожного покрытия; t_i – время, рассматриваемое с момента наступления «чрезвычайного события», начавшееся после превышения тормозной/тяговой силой максимально реализуемой силы/момента для определенного типа дорожного покрытия; $i = 0, \dots, n$; $\dot{F}_{\max} = \dot{F}_{\max}(\varphi_x)$ – параметр, идентифицируемый по экспериментальным данным, зависящий от коэффициента сцепления дорожного покрытия.

На рис. 3 приведены результаты моделирования фактической и тормозной сил, формируемых на колесе тормозным приводом, и их производные в контакте системы «дорога – колесо – ТС» для дорожного покрытия типа асфальт при доведении колеса до полного блокирования.

Рассмотрим изменение фактических тормозных сил и их производных при моделировании движения транспортного средства с АБС/ПБС в режиме разгона и торможения. Данный процесс состоит из трех повторяющихся фаз.

Первая фаза начинается в момент начала торможения/разгона и длится до того момента, когда тормозные/тяговые силы станут больше максимально реализуемой силы на колесе, что соответствует переходу \dot{F}_f через нуль в отрицательную область значений.

Вторая фаза начинается в момент превышения тормозными/тяговыми силами максимально реализуемой силы на колесе и закончится, в тот момент когда исполнительный механизм сработает после подачи управляющего сигнала на сброс давления в режиме торможения или при разгоне, когда управляющий сигнал уменьшит подачу топлива и/или поднимет давление в тормозном цилиндре.

Третья фаза начнется в тот момент, когда сработает исполнительный механизм после подачи управляющего сигнала на сброс давления в режиме торможения или при разгоне, т. е. управляющий сигнал уменьшит подачу топлива и/или поднимет давление в тормозном цилиндре, и закончится перед тем, как исполнительный механизм начнет функционировать после получения управляющего сигнала в режиме торможения – на увеличение давления, в режиме разгона – на увеличение подачи топлива и/или сброса давления в тормозном цилиндре до нуля.

Четвертая фаза начинается в тот момент, когда сработает исполнительный механизм после подачи управляющего сигнала на нарастание давления в режиме торможения или при разгоне, т. е. подача топлива возрастет и/или давление в тормозном цилиндре начнет сбрасываться до нуля. Четвертая фаза будет длиться до момента времени, пока тормозные/тяговые силы не станут больше максимально реализуемой силы на колесе. Дальше будет происходить циклическое изменение фаз 2, 3 и 4 до тех пор, пока водитель не уменьшит давление на педаль «тормоз/газ» или не произойдет смена дорожного покрытия с меньшим коэффициентом сцепления на больший.

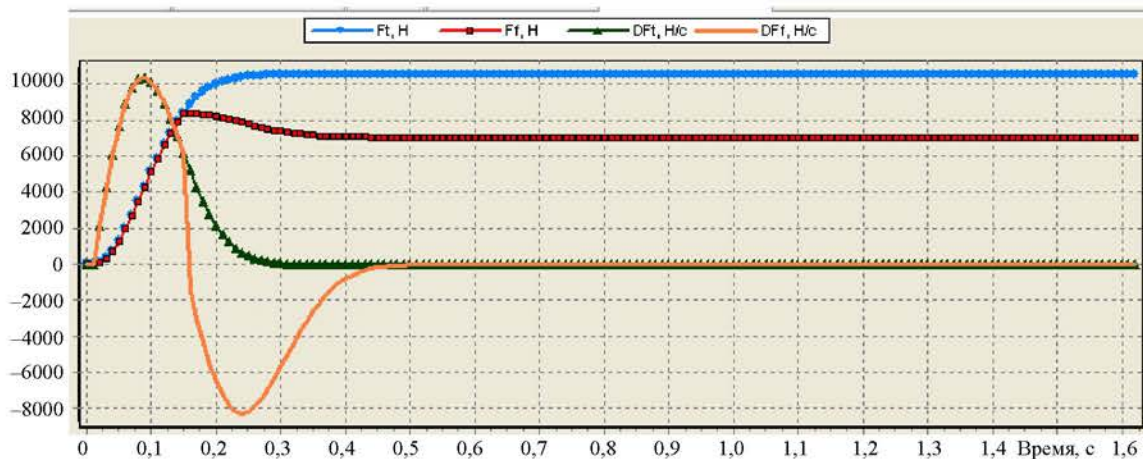


Рис. 3. Результаты моделирования фактических сил и их производных в контакте системы «дорога – колесо – ТС»

Таким образом, описанный выше алгоритм может быть представлен в виде:

$$\left. \begin{array}{l} F_f(t_i) = F_t(t_i); \\ \dot{F}_f(t_i) = \dot{F}_t(t_i); \\ \varphi_x(t_i) = \varphi_{x\max} \left(1 - \frac{F_f(t_i)}{\varphi_{x\max} R_z} \right), \end{array} \right\} \text{если } F_t(t) \leq \varphi_{x\max} R_z \text{ и } \dot{F}_t(t) \geq 0;$$

$$\left. \begin{array}{l} F_f(t_i) = R_z \varphi_{x\max} - R_z (\varphi_{x\max} - \varphi_{x\min}) e^{-at_i^2}; \\ \dot{F}_f(t_i) = 0 - \dot{F}_{\max} at_i e^{-at_i^2}; \\ \varphi_x(t_i) = \varphi_{x\max} - (\varphi_{x\max} - \varphi_{x\min}) (1 - e^{-at_i^2}); \end{array} \right\} \text{если } F_t(t) \geq \varphi_{x\max} R_z;$$

$$\left. \begin{array}{l} F_f(t_i) = F_t(t_i); \\ \dot{F}_f(t_i) = \dot{F}_t(t_i); \\ \varphi_x(t_i) = \varphi_{x\max} \left(1 - \frac{F_f(t_i)}{\varphi_{x\max} R_z} \right), \end{array} \right\} \text{если } F_t(t) \leq \varphi_{x\max} R_z \text{ и } \dot{F}_t(t) \leq 0;$$

$$\overline{i = 0, \dots, n,}$$

ВЫВОД

Разработаны алгоритмы моделирования свойств внешней среды в различных режимах движения (разгон, торможение) ТС, оснащенных и не оснащенных САБ, а также моделирования фактически реализуемых тормозных/тяговых сил/моментов и/или их производных в различных условиях движения. Результаты компьютерного моделирования показали эффективность рассмотренной концепции, алгоритмов и программ. Разработанные математические и программные средства виртуального проектирования позволяют повысить качество и снизить стоимость и сроки проектирования САБ нового поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Противоблокировочная** тормозная система транспортного средства: пат. № 1408 Респ. Беларусь / Р. И. Фурунжиев, В. А. Ким; заявл. 01.07.1993.
2. **Регулятор** Фурунжиева: пат. № 3160 Респ. Беларусь / Р. И. Фурунжиев; заявл. 19.04.1996.

3. **Способ** и регулятор для управления системами: пат. № 2153697 РФ / Р. И. Фурунжиев; заявл. 24.04.1997.

4. **Способ** Фурунжиева управления движением транспортного средства: пат. № 5182 Респ. Беларусь / Р. И. Фурунжиев; заявл. 10.03.1999.

5. **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 «Белавотракторостроение», 2001. – С. 282–291.

6. **Ревин, А. А.** Теория эксплуатационных свойств автомобилей и автопоездов с АБС в режиме торможения / ВолГТУ; А. А. Ревин. – Волгоград, 2002. – 372 с.

7. **Fourounjiev, R.** New Conception and Method of Identification and Control of the Intelligent Vehicle Safety Systems / R. Fourounjiev, Y. Slabko // Trans. of 6th International conference Vibroengineering-2006. – Kaunas University of Technology. – Lithuania, Technologija, 2006. – P. 173–178.

8. **Fourounjiev, R.** Computer-aided Modeling of the Adaptive Intelligent Vehicle Safety Systems. Trans. of 3rd International Conference «Mechatronic Systems and Materials (MSM-2007)». 27–29 september, 2007 / R. Fourounjiev, Y. Slabko. – Kaunas, Lithuania, 2007. – P. 139–140.

Поступила 24.04.2008