

Особенности компьютерного моделирования в реальном времени процесса торможения автомобильного колеса

Рассмотрены условия, необходимые для численного моделирования процесса торможения автомобильного колеса в реальном времени. Проведен анализ результатов использования некоторых из наиболее распространенных численных методов, которые используются для этой цели. Предложена новая методика расчета параметров процесса торможения автомобильного колеса, базирующаяся на адаптации системы к процессу интегрирования за счет применения переменного шага интегрирования. Показано, что использование предлагаемой методики позволяет сократить время расчета за счет увеличения шага интегрирования без увеличения погрешности рассчитываемых параметров.

Ключевые слова: автомобильное колесо, торможение, математическое моделирование, численные методы, адаптация системы к процессу интегрирования, переменный шаг интегрирования, сокращение времени расчета

Введение

Для исследования тормозной динамики автомобиля в настоящее время, по опыту большинства исследователей, используется комплексная (расчетно-экспериментальная) технология моделирования [3, 10, 17], заключающаяся в следующем. Комплекс состоит из стенда, включающего элементы кузова и шасси реального автомобиля, а также компьютерный имитатор движения этого автомобиля. Компьютерными методами задается внешнее возмущающее воздействие на виртуальную модель движущегося автомобиля, рассчитываются параметры движения автомобиля и передаются на исполнительные устройства стенда, воздействующие на реальные элементы систем управления автомобилем посредством реальных автоматизированных систем управления (ABS, ESP и т. д.). Для правильного воспроизведения "поведения" автомобиля на виртуальной дороге необходимо, чтобы суммарное время расчета и срабатывания исполнительных устройств не превышало времени реального течения процесса.

При расчете параметров движения автомобиля используются численные методы решения дифференциальных уравнений движения. При построении моделей движения необходимо соблюдать некоторые требования, которым должна соответствовать модель. Большинство исследователей, которые изучают методику математического моделирования и возможность ее применения для данного класса задач, выделяют следующие наиболее важные показатели эффективности, которые определяют требования к модели [1, 3, 4, 6, 7, 10–14, 17]:

1. Затраты машинного времени. В связи с использованием ЭВМ различного типа суммарные затраты складываются из времени ввода и вывода данных для каждого алгоритма моделирования, времени

на проведение вычислительных операций с учетом числа обращений к оперативной памяти и внешним устройствам, а также сложности каждого моделирующего алгоритма (число арифметических операций). Расчет затрат машинного времени может уточняться по мере отладки программы и накопления опыта у исследователя при работе с моделью.

2. Точность и достоверность результатов моделирования (адекватность модели исследуемому реальному объекту).

Таким образом, с течением времени для исследователей-автомобилистов [2, 4, 7, 9, 11–13, 17] и специалистов из других областей [8, 15, 16] все большую важность приобретает вопрос об обеспечении работы моделирующего комплекса в реальном времени. Возможность моделирования затормаживаемого колеса в реальном времени является важной задачей, которая до сих пор не решена, а снижение вычислительных затрат на сегодняшний день возможно лишь за счет снижения точности значений рассчитываемых параметров. До сих пор нет общих рекомендаций о том, как обеспечить возможность моделирования в реальном времени, т. е. приблизить время машинного расчета параметров модели к реальному времени процесса. Особое значение указанная проблема имеет при использовании комплексной технологии моделирования, так как работа моделирующей установки происходит в реальном времени и быстрее определяет принципиальную возможность применения комплексной технологии моделирования. В связи с этим необходимо дальнейшее исследование возможности снижения вычислительных затрат машинного времени при использовании комплексной технологии моделирования процесса торможения автомобильного колеса.

Методы и подходы

Инженеры в области автомобильного транспорта для исследования динамики процесса торможения используют самые разные модели автомобиля. Такие модели можно разделить на следующие классы:

1) пространственные — для учета влияния действующих в горизонтальной плоскости поворачивающих моментов, возникающих за счет неравенства тормозных сил и боковых реакций на траекторию движения автомобиля и, как следствие, крена кузова и перераспределения нормальных реакций. Так, в работе [12] модели этого типа применялись для выбора структуры управления тормозными моментами за счет применения схемы антиблокировочной системы (АБС);

2) плоские (типа "велосипед") — для учета динамики изменения нормальных нагрузок при дифференце кузова, в частности, для исследования колебаний элементов автомобиля с АБС [13];

3) плоские горизонтальные для прогнозирования управляемости колесной машины [18];

4) модели класса "колесо"; используются и как самостоятельные для отработки алгоритмов управления АБС [4, 7, 12, 13], и как элементы всех вышеперечисленных моделей для адекватного воспроизведения тормозных сил на колесах автомобиля.

При исследовании тормозной динамики автомобиля модель класса "колесо" занимает важнейшее место, поскольку она исследуется как сама по себе для моделирования поведения основных параметров торможения, так и в качестве составной части в более сложных моделях. Это один из наиболее динамичных модулей, которые вызывают наибольшие сложности при их математическом описании, что затрудняет решение модели в целом и может привести к значительным затратам времени на расчет модели и к снижению точности моделирования. В связи с этим в данной работе для исследования процесса торможения в качестве основной использовалась модель одиночного колеса автомобиля.

Процесс торможения одиночного колеса обычно представляют следующей системой уравнений [4, 7, 11–13, 17]:

$$\begin{cases} M = f(t) — \text{закон нарастания тормозного момента;} \\ \dot{\omega} = \frac{1}{j} [-M + \varphi mgr] — \text{уравнение движения колеса;} \\ \omega = \omega_0 + \int \dot{\omega} dt — \text{изменение угловой скорости колеса;} \\ \dot{v} = -\varphi g — \text{замедление оси колеса;} \\ v = v_0 + \int \dot{v} dt — \text{изменение скорости оси колеса;} (1) \\ s = 1 - \frac{\omega r}{v} — \text{коэффициент продольного скольжения колеса;} \\ \varphi = \frac{f_0 s}{as^2 + bs + c} — \text{эмпирическая зависимость для} \\ \text{расчета коэффициента продольного сцепления,} \end{cases}$$

где t — текущее значение времени процесса; M — тормозной момент, приложенный к колесу; ω_0 , v_0 —

начальные значения угловой и линейной скоростей колеса; $\dot{\omega}$, ω — угловое ускорение и скорость колеса; $\dot{v}$, v — линейное ускорение и скорость оси колеса; j , m — момент инерции колеса и масса, приходящаяся на колесо; g — ускорение свободного падения; r — динамический радиус колеса; φ — коэффициент сцепления между колесом и дорогой в продольном направлении; S — коэффициент продольного скольжения колеса; a , b , c — эмпирические коэффициенты; f_0 — коэффициент продольного сцепления при состоянии колеса — "юз" (коэффициент сопротивления скольжению колеса при известном состоянии поверхности дороги).

В соответствии с целью и задачами исследования для системы (1) приняты следующие традиционные допущения [4, 5, 7, 10, 11]:

- торможение происходит по прямолинейной траектории;
- поверхность дороги — ровная, горизонтальная, бесконечно жесткая;
- контакт шины с дорогой точечный;
- сила аэродинамического сопротивления равна нулю;
- вертикальная нагрузка на колесо имеет постоянное значение;
- динамический радиус колеса имеет постоянное значение;
- значение коэффициента сопротивления качению колеса равно нулю;
- коэффициент сцепления колеса с дорогой при состоянии колеса "юз" имеет постоянное значение.

Исходные данные и постоянные величины, принятые в системе (1), приведены в табл. 1.

Таблица 1
Исходные данные и постоянные величины, принятые для решения системы (1)

Наименование	Обозначение	Значение
Значение линейной скорости в начальный момент времени	v_0	20 м/с
Линейное и угловое ускорение в начальный момент времени	$\dot{\omega}_0$, $\dot{v}_0$	0
Момент инерции колеса ВАЗ-2106	j	$0,9 \text{ м} \cdot \text{с}^2$
Масса, приходящаяся на колесо ВАЗ-2106	m	350 кг
Ускорение свободного падения	g	$9,8 \text{ м/с}^2$
Динамический радиус колеса ВАЗ-2106	r	0,285 м
Эмпирические коэффициенты для состояния дорожной поверхности "сухой асфальтобетон"	a ; b ; c ; f_0	0,342; 0,612; 0,046; 0,7
Эмпирические коэффициенты для состояния дорожной поверхности "сухой асфальтобетон"	a ; b ; c ; f_0	0,4; 0,584; 0,016; 0,4
Эмпирические коэффициенты для состояния дорожной поверхности "лед"	a ; b ; c ; f_0	0,057; 0,398; 0,032; 0,1
Значение тормозного момента в начальный момент времени	M_0	0
Перед началом торможения проскальзывание равно нулю	$\omega_0 = \frac{v_0}{r}$	
Закон изменения тормозного момента [5]	$M(t) = 4500t$ — для режима экстренного торможения	

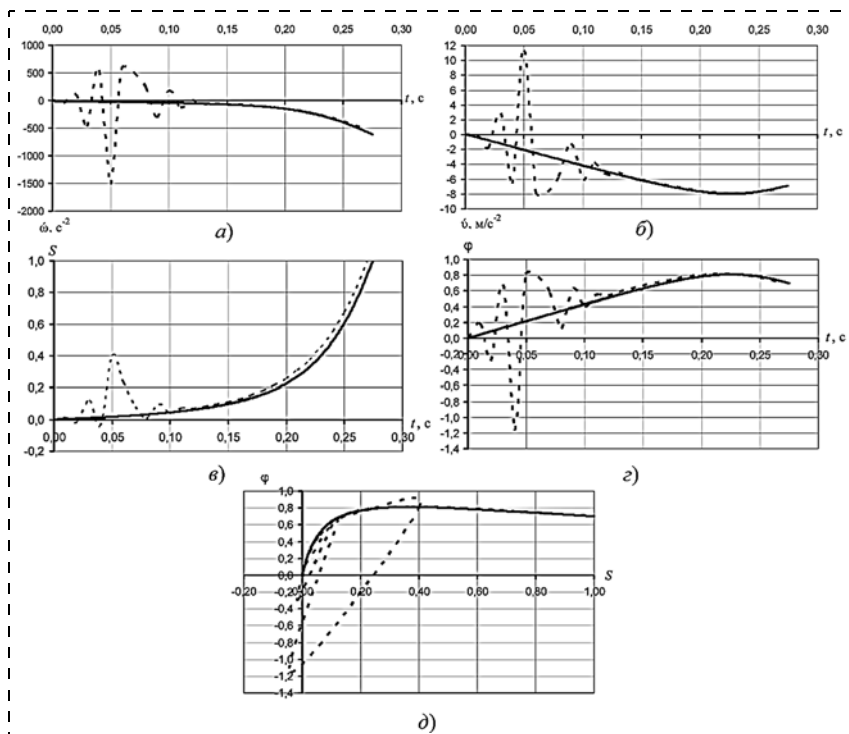


Рис. 1. Зависимости расчетных параметров торможения автомобильного колеса на поверхности типа "сухой асфальтобетон" для разных шагов интегрирования при использовании неявного метода Эйлера (— — шаг интегрирования равен 0,001 с, - - - шаг интегрирования равен 0,01 с):

а — зависимость углового ускорения от времени процесса торможения; **б** — зависимость линейного ускорения от времени процесса торможения; **в** — зависимость коэффициента относительного проскальзывания от времени процесса торможения; **г** — зависимость коэффициента сцепления от времени процесса торможения; **д** — зависимость коэффициента сцепления от коэффициента относительного проскальзывания

В этой таблице момент инерции колеса, масса, приходящаяся на колесо, динамический радиус колеса соответствуют значениям, характерным для колес автомобилей ВАЗ.

Расчет параметров системы (1) проводился с использованием неявного метода Эйлера, как одного из наиболее подходящих [17].

Результаты расчета показаны на рис. 1.

Как видно из рис. 1, при использовании шага интегрирования 0,01 с имеет место явление неустойчивости решения, причем для разных параметров оно проявляется с разной интенсивностью.

При проведении аналогичных расчетов для дорожной поверхности типа мокрый асфальтобетон неустойчивость выражена гораздо более сильно, а для дорожного покрытия типа лед неустойчивость отсутствует.

В работе [1] показано, что применение любых численных методов приводит к возникновению определенных погрешностей расчета искомых параметров. Значение и изменение этой погрешности в процессе моделирования зависят от численного метода, шага интегрирования, алгоритма расчета, погрешностей и значений исходных данных, закона изменения тормозного момента, типа и состояния дорожной поверхности, особенностей решаемой системы дифференциальных уравнений. Как было

показано в работах [1, 3], при использовании для решения системы (1) численных методов (на примере методов Эйлера, трапеций, Рунге—Кутты, Адамса, прогноза и коррекции) возникает погрешность решения, значение которой изменяется от 10 до 100 % с течением времени процесса при использовании любого шага интегрирования. Там же было показано, что при решении системы (1) с шагом интегрирования 0,005 с и более (в зависимости от метода решения) возникает явление неустойчивости решения, которое делает невозможным исследование процесса и использование рассчитываемых значений параметров системы (1) для вырабатывания управляющих сигналов. Как было показано в работе [1] и как видно из рис. 1, неустойчивость расчета параметров системы (1) проявляется на начальном интервале времени процесса торможения, и максимальные значения погрешностей также имеют место на этом же интервале. Таким образом, начальный интервал является наиболее проблематичным для численного расчета параметров системы (1).

В связи с этим авторами данного исследования была предложена особая методика расчета параметров системы (1) на начальном интервале расчета,

заключающаяся в адаптации системы к процессу интегрирования. Суть предлагаемой методики заключается в использовании разных шагов интегрирования для расчета параметров системы (1). Предлагается на начальном интервале расчета использовать шаг интегрирования 0,001 с, а дальнейший расчет проводить с шагом интегрирования 0,01 с.

Для реализации предлагаемой методики необходимо определить продолжительность начального интервала расчета, на котором будем использовать шаг интегрирования, равный 0,001 с (далее будем называть этот интервал "начальным"). Продолжительность "начального" интервала времени зависит от закона изменения тормозного момента и типа дорожной поверхности. Четких рекомендаций по определению продолжительности "начального" интервала на данном этапе исследования не сформулировано. Предлагается для определения продолжительности "начального" интервала провести тестовые расчеты и графическим способом выявить интервал, на котором имеет место неустойчивость. Продолжительность "начального" интервала предлагается выбирать таким образом, чтобы она составляла от 80 до 100 % интервала, на котором проявляется неустойчивость.

Для подтверждения возможности использования такой методики были выполнены соответст-

вующие расчеты. Были проанализированы следующие типы дорожного покрытия:

- сухой асфальтобетон,
 - мокрый асфальтобетон,
 - лед
- и следующие режимы торможения:
- экстренный режим торможения ($M(t) = 4500t$),
 - режим торможения с интенсивностью в пять раз меньшей, чем при экстренном торможении ($M(t) = 900t$),
 - с интенсивностью в десять раз меньшей, чем при экстренном торможении ($M(t) = 450t$).

Анализ результатов исследования

На основе предложенной методики были определены продолжительности "начальных" интервалов, которые представлены в табл. 2.

Результаты расчетов параметров системы (1) для разных сочетаний закона изменения тормозного момента и типа дорожного покрытия представлены на рис. 2...7. Как видно из этих рисунков, применение переменного шага интегрирования оказывает неодинаковое влияние на расчет параметров системы (1) в зависимости от типа дорожного покрытия и закона изменения тормозного момента.

В случае сочетания типа дорожного покрытия "мокрый асфальтобетон" и законов изменения тормозного момента $M(t) = 900t$ и $M(t) = 450t$ (рис. 5, 7), а также покрытия "сухой асфальтобетон" и закона изменения тормозного момента $M(t) = 450t$ (рис. 6) расчет параметров системы (1) с шагом интегрирования, равным 0,01 с, вообще не представляется возможным, поскольку, начиная со второго шага ин-

Таблица 2
Продолжительность "начального" интервала для разных типов дорожного покрытия и законов изменения тормозного момента для расчета параметров системы (1) с использованием неявного метода Эйлера

Тип дорожного покрытия	Закон изменения тормозного момента		
	$M(t) = 4500t$	$M(t) = 900t$	$M(t) = 450t$
Лед	Неустойчивость отсутствует 0,1 (0,27)	Неустойчивость отсутствует 0,6 (1,05)	Неустойчивость отсутствует 0,6 (1,8)
Сухой асфальтобетон			
Мокрый асфальтобетон	0,1 (0,23)	0,3 (0,78)	0,6 (1,4)

Примечание. В скобках дано время наступления состояния "юз". Значения даны в секундах.

тегрирования, значения расчетных параметров получают значения, которые противоречат физическому смыслу рассматриваемого процесса торможения автомобильного колеса. Применение переменного шага интегрирования позволяет для такого сочетания типа дорожного покрытия и законов изменения тормозного момента получить представление о значениях и изменении расчетных параметров системы (1), однако на существенном интервале времени процесса торможения (от 20 до 33 % времени всего анализируемого процесса) имеет место явление неустойчивости.

Использование переменного шага в этом случае позволяет рассчитать значения параметров системы (1) на существенном временном интервале (кроме интервала с неустойчивостью) и получить

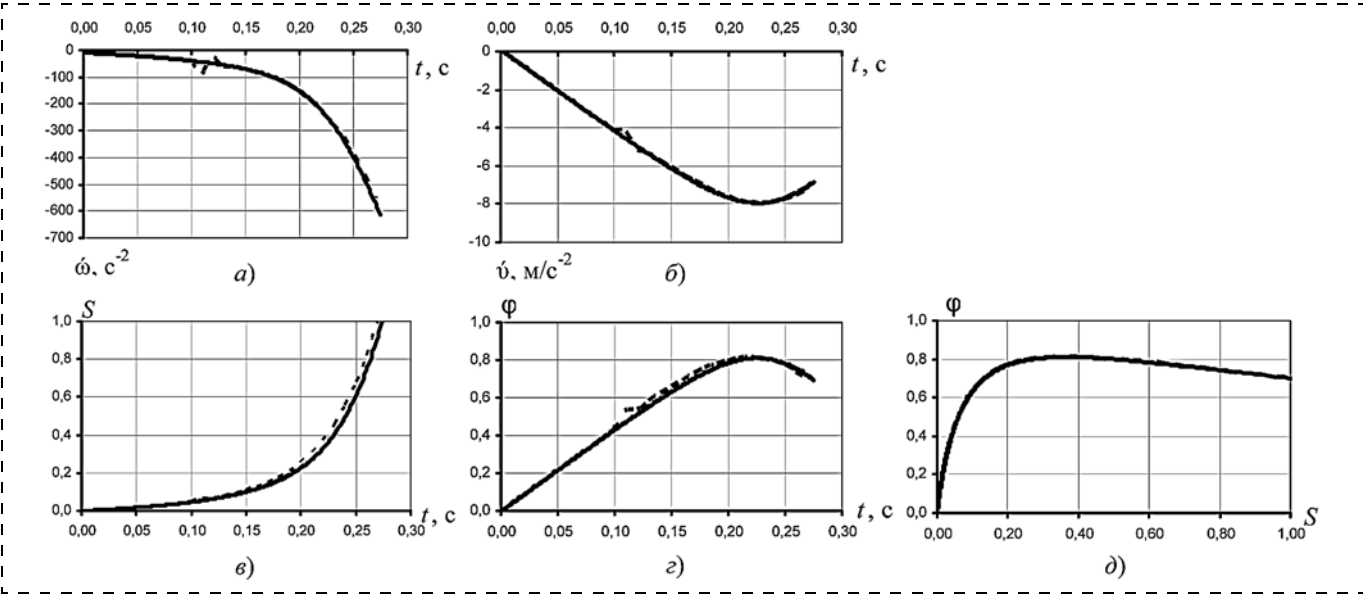


Рис. 2. Зависимости расчетных параметров торможения автомобильного колеса на поверхности типа "сухой асфальтобетон" и при законе изменения тормозного момента $M(t) = 4500t$ для разных шагов интегрирования при использовании неявного метода Эйлера (— шаг интегрирования равен 0,001 с, --- переменный шаг интегрирования, равен 0,001 с — 0,01 с): а — зависимость углового ускорения от времени процесса торможения; б — зависимость линейного ускорения от времени процесса торможения; в — зависимость коэффициента относительного проскальзывания от времени процесса торможения; з — зависимость коэффициента сцепления от времени процесса торможения; д — зависимость коэффициента сцепления от коэффициента относительного проскальзывания

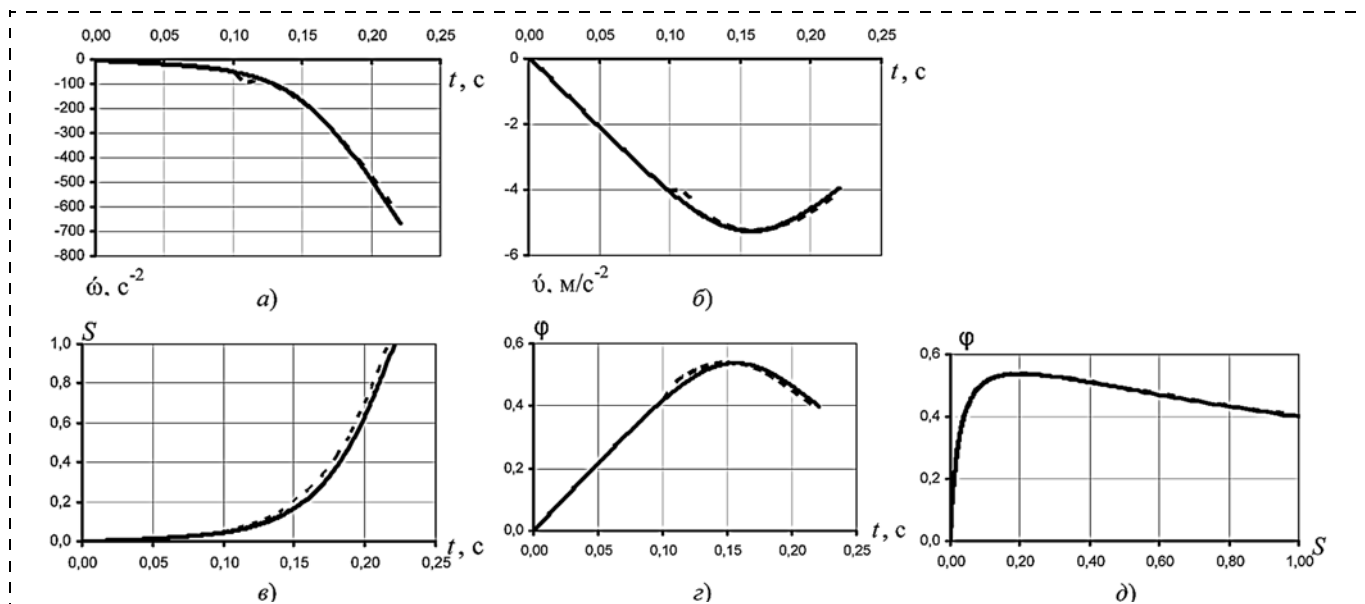


Рис. 3. Зависимости расчетных параметров торможения автомобильного колеса на поверхности типа "мокрый асфальтобетон" и при законе изменения тормозного момента $M(t) = 4500t$ для разных шагов интегрирования при использовании неявного метода Эйлера (— шаг интегрирования равен 0,001 с, --- переменный шаг интегрирования, равен 0,001 с — 0,01 с): а — зависимость углового ускорения от времени процесса торможения; б — зависимость линейного ускорения от времени процесса торможения; в — зависимость коэффициента относительного проскальзывания от времени процесса торможения; д — зависимость коэффициента сцепления от коэффициента относительного проскальзывания

значения параметров системы (1) в момент, когда колесо входит в состояние "юз", что было невозможно при использовании шага, равного 0,01 с.

В случае сочетания закона изменения тормозного момента $M(t) = 900t$ и типа дорожного покрытия "сухой асфальтобетон" (см. рис. 4) применение переменного шага интегрирования позволяет полно-

стью исключить явление неустойчивости, при этом расчетные значения параметров системы (1), соответствующие временному интервалу после окончания "начального", несущественно отличаются от значений этих же параметров, рассчитанных с шагом интегрирования, равным 0,001 с (из рис. 4 видно, что эти кривые накладываются друг на друга).

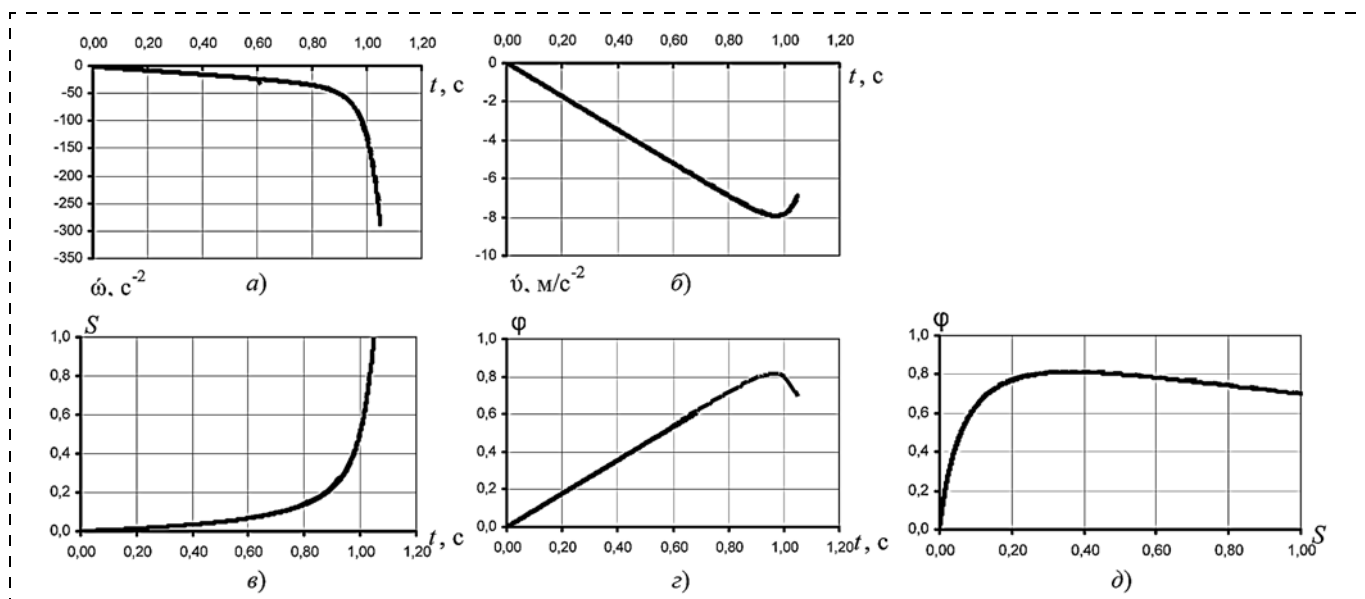


Рис. 4. Зависимости расчетных параметров торможения автомобильного колеса на поверхности типа "сухой асфальтобетон" и при законе изменения тормозного момента $M(t) = 900t$ для разных шагов интегрирования при использовании неявного метода Эйлера (— шаг интегрирования равен 0,001 с, --- переменный шаг интегрирования, равен 0,001 с — 0,01 с): а — зависимость углового ускорения от времени процесса торможения; б — зависимость линейного ускорения от времени процесса торможения; в — зависимость коэффициента относительного проскальзывания от времени процесса торможения; д — зависимость коэффициента сцепления от коэффициента относительного проскальзывания

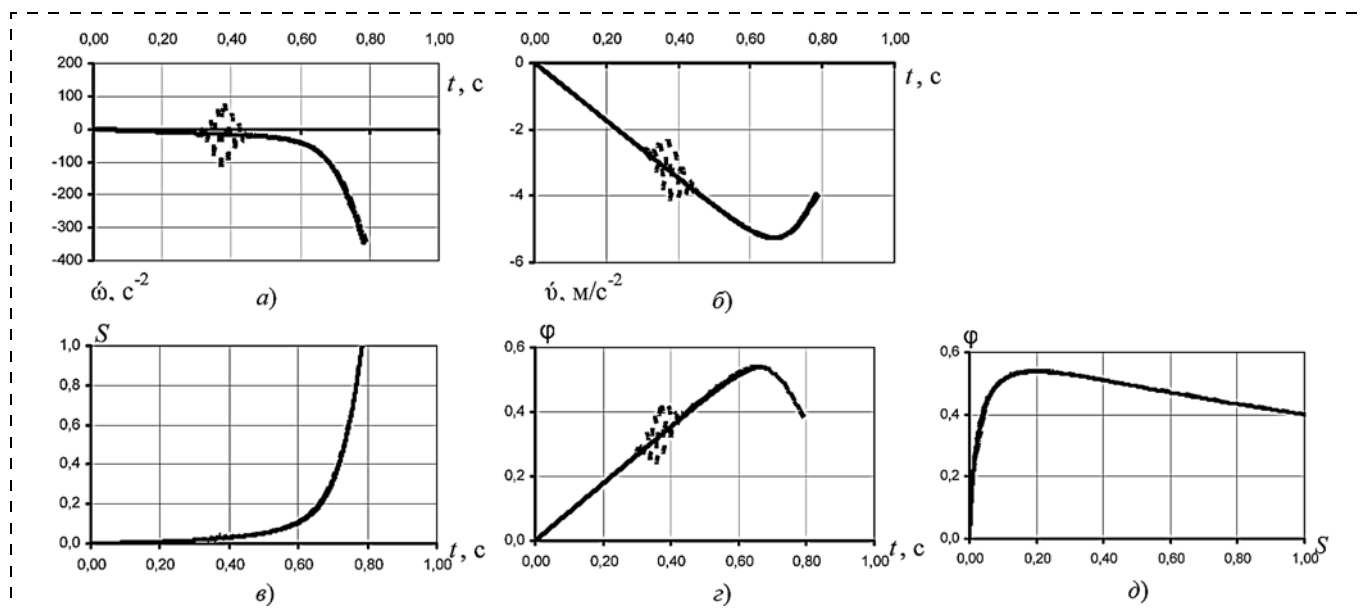


Рис. 5. Зависимости расчетных параметров торможения автомобильного колеса на поверхности типа "мокрый асфальтобетон" и при законе изменения тормозного момента $M(t) = 900t$ для разных шагов интегрирования при использовании неявного метода Эйлера (— шаг интегрирования равен 0,001 с, - - - переменный шаг интегрирования, равен 0,001 с — 0,01 с):

a — зависимость углового ускорения от времени процесса торможения; b — зависимость линейного ускорения от времени процесса торможения; e — зависимость коэффициента относительного проскальзывания от времени процесса торможения; z — зависимость коэффициента сцепления от времени процесса торможения; d — зависимость коэффициента сцепления от коэффициента относительного проскальзывания

В случае сочетания закона изменения тормозного момента $M(t) = 450t$ и типа дорожного покрытия "мокрый асфальтобетон" (см. рис. 6) применение переменного шага интегрирования не позволяет исключить явление неустойчивости, сокращается лишь интервал проявления неустойчивости расчета параметров системы (1).

Наибольший эффект от применения переменного шага достигается в случае сочетания закона изменения тормозного момента $M(t) = 4500t$, что соответствует экстремному режиму торможения, и типам дорожного покрытия "сухой асфальтобетон" и "мокрый асфальтобетон", что видно из рис. 2 и 3. Рассмотрим в сравнении зависимости, которые

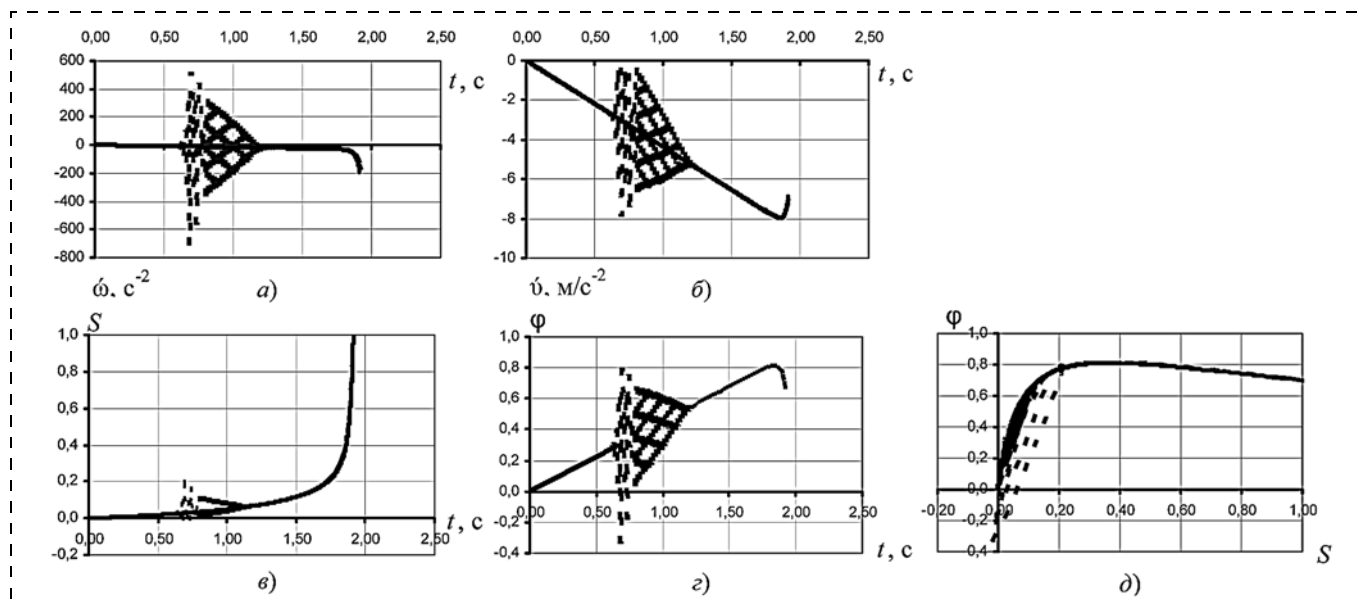


Рис. 6. Зависимости расчетных параметров торможения автомобильного колеса на поверхности типа "сухой асфальтобетон" и при законе изменения тормозного момента $M(t) = 450t$ для разных шагов интегрирования при использовании неявного метода Эйлера (— шаг интегрирования равен 0,001 с, - - - переменный шаг интегрирования, равен 0,001 с — 0,01 с):

a — зависимость углового ускорения от времени процесса торможения; b — зависимость линейного ускорения от времени процесса торможения; e — зависимость коэффициента относительного проскальзывания от времени процесса торможения; z — зависимость коэффициента сцепления от времени процесса торможения; d — зависимость коэффициента сцепления от коэффициента относительного проскальзывания

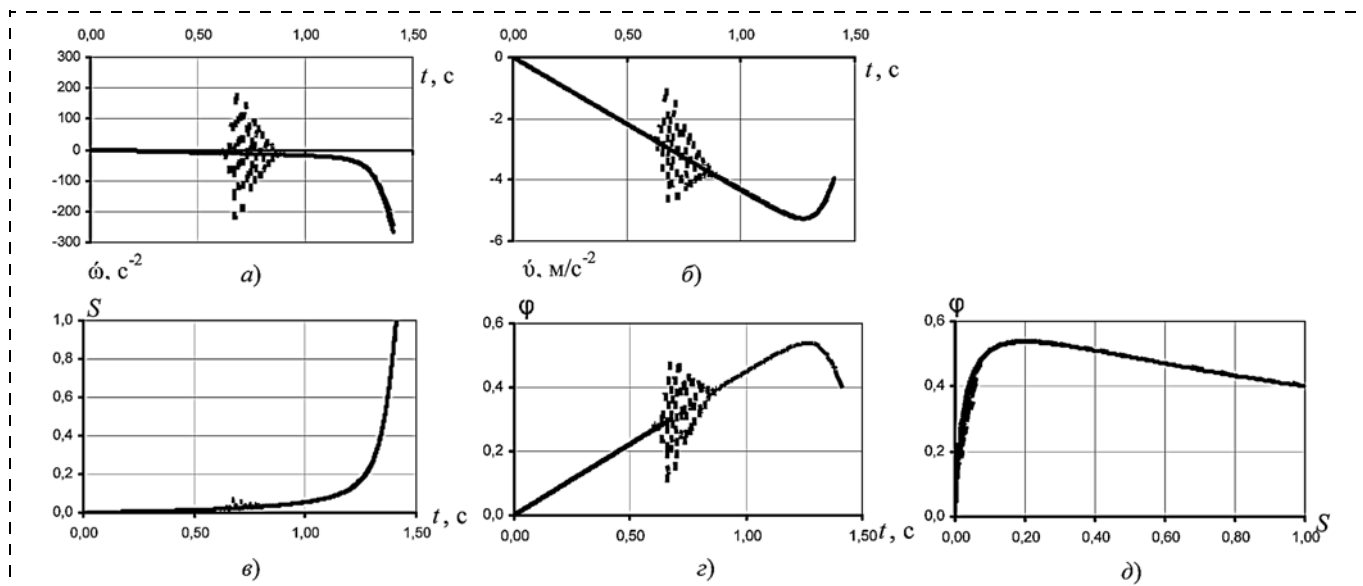


Рис. 7. Зависимости расчетных параметров торможения автомобильного колеса на поверхности типа "мокрый асфальтобетон" и при законе изменения тормозного момента $M(t) = 450t$ для разных шагов интегрирования при использовании неявного метода Эйлера (— шаг интегрирования равен 0,001 с, - - - переменный шаг интегрирования, равен 0,001 с — 0,01 с):

a — зависимость углового ускорения от времени процесса торможения; b — зависимость линейного ускорения от времени процесса торможения; v — зависимость коэффициента относительного проскальзывания от времени процесса торможения; g — зависимость коэффициента сцепления от времени процесса торможения; d — зависимость коэффициента сцепления от коэффициента относительного проскальзывания

представлены на рис. 1 и рис. 2. При использовании для расчета параметров системы (1) шага интегрирования 0,01 с неустойчивость проявляется на протяжении почти половины всего рассматриваемого процесса торможения и имеет существенную амплитуду, которая превышает значения этих же параметров, рассчитанных с шагом интегрирования, равным 0,001 с, более чем в десять раз (см. рис. 1). При использовании переменного шага интегрирования отклонения расчетных параметров системы (1) относительно рассчитанных с шагом интегрирования 0,001 с имеют место лишь в трех расчетных точках после окончания "начального" интервала (см. рис. 2), остальные значения рассчитываемых параметров системы (1) накладываются на значения, рассчитанные с шагом интегрирования 0,001 с.

Выводы

Применение переменного шага интегрирования в задачах моделирования процесса торможения автомобильного колеса позволяет:

1) почти полностью исключить явление неустойчивости расчета параметров системы (1) в случае моделирования экстренного торможения на поверхностях типа "сухой асфальтобетон" и "мокрый асфальтобетон" и в случае закона изменения тормозного момента $M(t) = 900t$ на дорожной поверхности типа "сухой асфальтобетон";

2) получить представление о значениях и характере изменения расчетных параметров системы (1) для законов изменения тормозного момента $M(t) = 900t$

и $M(t) = 450t$ на дорожной поверхности типа "мокрый асфальтобетон", рассчитать значения параметров системы (1) на всем интервале процесса торможения до наступления состояния "юз" колеса;

3) при использовании для расчета большего шага интегрирования сократить время расчета параметров торможения автомобильного колеса более чем в 10 раз.

Работа выполнена в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 14-08-00042А "Развитие исследования и моделирования взаимосвязанных явлений в контакте эластичного колеса с твердой опорой в новом представлении".

Список литературы

1. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике: учебник для вузов. 3-е изд. / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 496 с.
2. Зотов В. М., Зотов Н. М., Федин А. П. Некоторые задачи и пути совершенствования численного моделирования динамических процессов // Наземные транспортные системы: Межвуз. сб. науч. тр. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2000. 148 с.
3. Зотов В. М., Зотов Н. М., Федин А. П. Проблемы численного моделирования динамических процессов в реальном времени и возможные пути их решения // Математика. Компьютер. Образование: сб. науч. трудов. 2000. Вып. 7, Ч. 2. С. 597—603.
4. Иванов В. В. Колебания автомобиля с антиблокировочной системой при торможении. Диссертация ... канд. техн. наук. Волгоград, 1986. 172 с.
5. Ким В. А. Методология создания адаптивных САБ АТС на основе силового анализа / Под ред. Р. И. Фурунжиева. Могилев: Белорусско-Российский университет, 2003. 344 с.
6. Кокорев Д. Ю. Программное обеспечение имитационного моделирования для виброиспытаний // Математическое моделирование и краевые задачи. Самара: Изд-во СамГТУ, 2004. Т. 2. № 5.

7. **Кранцов Г. П.** Оценка тормозных свойств автомобиля с автоматизированным приводом модельным методом. Диссертация ... канд. техн. наук. Волгоград, 1994. 146 с.
8. **Новосельцев В. Н.** Математическое моделирование и теория управления (над страницами книги А. А. Самарского и А. П. Михайлова "Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры"). Институт проблем управления РАН. URL: http://dkb.kazan.ru/00_1_1
9. **Пименов В. Г.** Управляемые и численные модели с последствием. Автореферат диссертации ... доктора физико-математических наук. Екатеринбург: Изд-во ИПЦ Издательство УрГУ, 2001. 20 с.
10. **Ревин А. А.** Повышение эффективности, устойчивости и управляемости при торможении автотранспортных средств. Диссертация ... доктора техн. наук Волгоград, 1983. 601 с.
11. **Ревин А. А.** Комплексная технология моделирования тормозной динамики автомобиля. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2000. 92 с.
12. **Ревин А. А.** Теория эксплуатационных свойств многоосных автомобилей и автопоездов с АБС в режиме торможения: учебное пособие. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 1997. 95 с.

13. **Ревин А. А.** Теория эксплуатационных свойств автомобилей и автопоездов с АБС в режиме торможения. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2002. 372 с.
14. **Самарский А. А., Михайлов А. П.** Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Наука, 1997. 316 с.
15. **Самарский А. А., Вабишевич П. Н.** Математическое моделирование и вычислительный эксперимент. URL: <http://www.imamod.ru>.
16. **Учаев Р. С., Борзых С. В., Шиблев Ю. Н.** Математическое моделирование процесса раскрытия солнечных батарей со сложной кинематической схемой раскрытия // Юбилейная XV Междунар. Интернет-конф. по современным проблемам машиноведения. Королев, РКК Энергия им. С. П. Королева. М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2003.
17. **Федин А. П.** Обеспечение адекватности моделирования рабочих процессов элементов автомобиля при испытаниях на виртуально-физических стендах-тренажерах: Диссертация ... канд. техн. наук. Волгоград, 2006. 239 с.
18. **Ходес И. В.** Методология прогнозирования управляемости колесной машины. Диссертация ... доктора техн. наук. Волгоград, 2007. 377 с.

Features of Computer Simulation in Real Time of the Braking Process of Automobile Wheel

E. V. Balakina, balakina@vstu.ru, **N. M. Zotov**, zotovnm@vstu.ru, **A. P. Fedin**, falexey2005@yandex.ru,
Volgograd State Technical University, 400005, Volgograd, Russian Federation

Date received: 22.10.14

The article is dedicated to the mathematical modeling of a movement trajectory of an automobile wheel. The authors discuss a problem of the description of a wheel braking process and calculation of its parameters in real time. They analyze the efficiency of the most widespread numerical methods which are applied for this purpose and considered the conditions, necessary for carrying out of the numerical modeling process of braking of an automobile wheel in real time.

They propose and analyze a new method of the numerical solution of the equations of movement of a wheel in a braking mode.

It is based on adaptation of the system to the integration process. Adaptation is carried out by means of application of a variable step of integration. Integration with small and greater steps is applied for elimination of the instability of calculation. At the initial stage the integration is done by small steps in order to ensure stability of the solution. The further integration is done by greater steps in order to decrease the time for calculation and maintain the stability of the solution.

It was demonstrated, that application of the proposed method allows us to reduce the total time necessary for calculation due to an increase of the integration step without a bigger error risk in the counted parameters.

This method is most effective for calculation of the movement parameters of an automobile wheel, loaded by maximal brake moment, in the braking mode on the road surface of any kind and state.

Keywords: automobile wheel, braking, mathematical modeling, numerical methods, adaptation of system to the integration process, variable step of integration, reduction the calculation time

For citation:

Balakina E. V., Zotov N. M., Fedin A. P. Features of Computer Simulation in Real Time of the Braking Process of Automobile Wheel, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 174–181.

DOI: 10.17587/mau.16.174-182

References

1. **Zarubin V. S.** *Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike* (Mathematical modeling in engineering), Moscow, Izdatel'stvo MG TU im. N. E. Bauman, 2010, 496 p. (in Russian).
2. **Zotov V. M., Zotov N. M., Fedin A. P.** Nekotorye zadachi i puti sovershenstvovaniya chislennogo modelirovaniya dinamicheskikh protsessov, *Nazemnye Transportnye Sistemy: Mezhdunarodnyi Sbornik Nauchnykh Trudov*, Volgograd, Izdatel'stvo VolgGTU, 2000, 148 p. (in Russian).
3. **Zotov V. M., Zotov N. M., Fedin A. P.** Problemy chislennogo modelirovaniya dinamicheskikh protsessov v real'nom vremeni i vozmozhnye puti ikh resheniya, part 2, *Matematika. Komp'yuter. Obrazovanie: Sbornik Nauchnykh Trudov*, 2000, iss. 7, pp. 597–603. (in Russian).

4. **Ivanov V. V.** *Kolebaniya avtomobilya s antiblokirovnochnoy sistemoy pri tormozhenii* (Vibration of a car with anti-lock braking system at braking), Doctors thesis, Volgograd, 1986, 172 p. (in Russian).
5. **Kim V. A.** *Metodologiya sozdaniya adaptivnykh SAB ATS na osnove silovogo analiza* (Methodology of creation of adaptive ABS of motor vehicles on the basis of the power analysis), Mogilev, Izdatel'stvo Belorussko-Rossiyskogo universiteta, 2003, 344 p. (in Russian).
6. **Kokorev D. Yu.** *Matematicheskoe modelirovanie i kraevye zadachi*, Samara, Izdatel'stvo SamGTU, 2004, iss. 2, no. 5. (in Russian).
7. **Krantsov G. P.** *Otsenka tormoznykh svoystv avtomobilya s avtomatizirovannym privodom model'nym metodom* (Evaluation of the braking properties of the vehicle with the automated actuator of the model method), Doctors thesis, Volgograd, 1994, 146 p. (in Russian).
8. **Novosel'tsev V. N.** *Matematicheskoe modelirovanie i teoriya upravleniya (nad stranitsami knigi A. A. Samarskogo i A. P. Mikhaylova "Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery")* (Mathematical modeling and control theory), Moscow, Published by Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov of RAS, available at: http://lgkb.kazan.ru/00_1_1
9. **Pimenov V. G.** *Upravlyaemye i chislennye modeli s posledeystviem* (Control and numerical models with delay), Doctors thesis, Ekaterinburg, Izdatel'stvo UrGU, 2001, 20 p. (in Russian).

10. **Revin A. A.** *Povyshenie effektivnosti, ustoychivosti i upravlyaemosti pri tormozhenii avtotransportnykh sredstv* (Efficiency, stability and control during braking of motor vehicles), Doctors thesis, Volgograd, 1983, 601 p. (in Russian).

11. **Revin A. A.** *Kompleksnaya tekhnologiya modelirovaniya tormoznoy dinamiki avtomobilya* (Integrated modeling technology of the braking dynamic of the car), Volgograd, Izdatel'stvo VolgGTU, 2000, 92 p. (in Russian).

12. **Revin A. A.** *Teoriya ekspluatatsionnykh svoystv mnogoosnykh avtomobiley i avtopoezdov s ABS v rezhime tormozheniya: Uchebnoe posobie* (The theory of operational properties of multiaxial cars and trucks with anti-lock braking system in braking mode), Volgograd, Izdatel'stvo VolgGTU, 1997, 95 p. (in Russian).

13. **Revin A. A.** *Teoriya ekspluatatsionnykh svoystv avtomobiley i avtopoezdov s ABS v rezhime tormozheniya* (The theory of operational properties of cars and trucks with anti-lock braking system in braking mode), Volgograd, Izdatel'stvo VolgGTU, 2002, 372 p. (in Russian).

14. **Samarskiy A. A., Mikhaylov A. P.** *Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery* (Mathematical modeling: ideas, methods, examples), Moscow, Nauka, 1997, 316 p. (in Russian).

15. **Samarskiy A. A., Vabishchevich P. N.** *Matematicheskoe modelirovanie i vychislitel'nyy eksperiment*, available at: <http://www.imamod.ru>.

16. **Uchaev R. S., Borzykh S. V., Shchiblev Yu. N.** *Materialy Yubileynoi XV Mezhdunarodnoi Internet—konferencii po sovremennym problemam mashinovedeniya*. Korolev, RKK Energiya im. S. P. Koroleva, Moscow, Izdatel'stvo IMASH RAN, 2003. (in Russian).

17. **Fedin A. P.** *Obespechenie adekvatnosti modelirovaniya rabochikh protsessov elementov avtomobilya pri ispytaniyakh na virtual'no-fizicheskikh standakh-trenazherakh* (The adequacy of the modeling workflow elements of the car at testing on a virtual-physical stands simulators), Doctors thesis, Volgograd, 2006, 239 p.

18. **Rhodes I. V.** *Metodologiya prognozirovaniya upravlyaemosti kolesnoy mashiny* (Methodology of forecasting controllability of the wheeled vehicles), Doctors thesis, Volgograd, 2007, 377 p.

Corresponding author:

Balakina Ekaterina V., D. Sc. (Engineering), Professor of Chair "Operation and Maintenance of Automobiles", Volgograd State Technical University, Lenin avenue, 28, 400005, Volgograd, Russian Federation, phone office (8442) 248461, e-mail: balakina@vstu.ru

УДК 681.513.5

О. В. Горячев, д-р техн. наук, проф., зав. каф., info@sau.tsu.tula.ru,

А. Г. Ефромеев, ассистент, age@sau.tsu.tula.ru,

Тульский государственный университет

Алгоритм управления приводом стабилизации и изменения углового положения объекта с вращающимся основанием

Представлена методика синтеза алгоритма управления приводом стабилизации и изменения углового положения объекта, особенностью которого является тот факт, что ротор связан с вращающимся с переменной частотой под действием внешних сил основанием, а угол поворота статора должен быть стабилизирован в заданном положении, при этом максимальная угловая скорость поворота статора строго ограничена.

Ключевые слова: алгоритм управления, бесконтактный двигатель постоянного тока, моментный двигатель, система стабилизации, электропривод

Введение

Исполнительные электрические приводы некоторых систем стабилизации и управления специального назначения, работающие на подвижном основании, устроены таким образом, что ротор исполнительного двигателя вращается за счет действия момента внешних сил, а положением статора необходимо управлять относительно неподвижной системы отсчета. При этом на характер переходного процесса накладывают жесткие требования: отсутствие перегрузки и ограничение на максимальную скорость отработки входных сигналов. Кроме того, предъявляются требования к точности: как правило, ошибка по углу при переменной частоте вращения основания не должна превышать единиц мрад. Вопросам создания систем управления для электрических приводов стабилизации и наведения посвящено большое число научных работ, например [1—4]. Но известные методики проектирования систем управления электроприводов стабилизации и управления не позволяют эффек-

тивно и в полной мере решить задачу разработки алгоритма управления рассматриваемым приводом, у которого скорость вращения ротора исполнительного двигателя под действием внешних сил значительно превышает (практически на два порядка) максимально допустимую скорость поворота объекта управления, связанного со статором исполнительного двигателя. С учетом изменяющейся во времени скорости вращения ротора авторами разработан специальный алгоритм управления приводом на базе квазиоптимального по быстродействию алгоритма с установленным ограничением скорости изменения углового положения объекта.

Построение математической модели исполнительного двигателя

Для синтеза алгоритма управления необходимо сначала получить математическую модель исполнительного двигателя. Воспользуемся исходной моделью бесконтактного двухфазного моментного двигателя в неподвижной системе координат, опи-