

**Теоретическое обоснование требований к системе автоматического адаптивного управления электротрансмиссией полноприводного четырехосного автомобиля с индивидуальным приводом ведущих колес**

к.ф.-м.н. доц. Кулаков Н.А., к.т.н. проф. Лепешкин А.В., Черанев С.В.  
МГТУ «МАМИ»

(495) 223-05-23, доб. 1154, 1426, lep@mami.ru

*Аннотация.* В статье представлены результаты исследований разработанной математической модели прямолинейного движения полноприводного четырехосного автомобиля с индивидуальным регулируемым электроприводом его ведущих колес, позволившие обосновать требования к системе автоматического адаптивного управления (СААУ) электротрансмиссией такой машины, снижающие влияние негативных факторов на работу машины при переезде через единичное синусоидальное препятствие.

*Ключевые слова:* многоприводные колесные машины, индивидуальный привод ведущих колес, регулируемая электрическая трансмиссия, требования к СААУ электротрансмиссии.

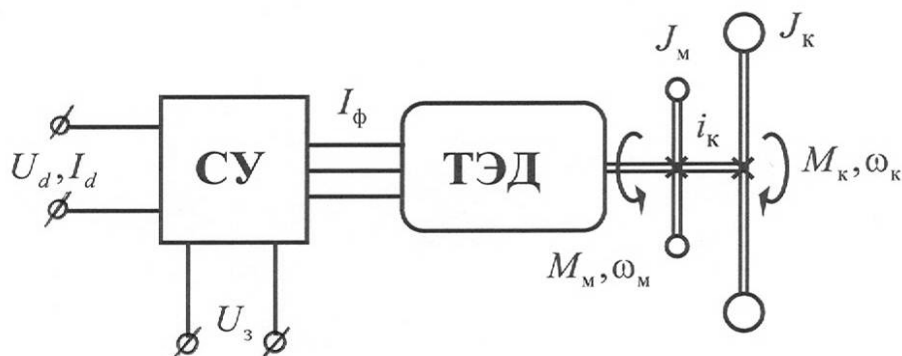
В данной статье приведены данные научных исследований, полученные при выполнении Государственного контракта № 579 от 31.03.2004 г. в рамках Гособоронзаказа, а также Государственного контракта № П1131 от 02.06.2010 на поисковые научно-исследовательские работы для государственных нужд по заданию Министерства образования и науки РФ на 2010 – 2012 г.г. в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Данная статья иллюстрирует результаты, полученные при исследовании математической модели прямолинейного движения опытного образца полноприводного четырехосного специального шасси БАЗ-6910Э (рисунок 1) с индивидуальным регулируемым электроприводом его ведущих колес по недеформируемой опорной поверхности. Описание этой математической модели и целей ее разработки приведено в работе [1].



**Рисунок 1 – Специальное полноприводное четырехосное шасси БАЗ-6910Э**

Отличительной особенностью рассматриваемого автомобиля является использование в нем электрической трансмиссии (ЭТ), состоящей из восьми независимых электроприводов. Каждый из этих электроприводов (рисунок 2) содержит тяговый электродвигатель (ТЭД) и его штатную систему управления (СУ). Эта система управления ЭТ на основании сигнала задания  $U_3$ , используя возможности общей системы питания ( $U_d$  и  $I_d$ ), формирует сигнал управления ТЭД в виде некоторого значения тока фазы  $I_\phi$ . Таким образом, данный электропривод обеспечивает индивидуальный регулируемый привод ведущих колес рассматриваемого автомобиля.



**Рисунок 2 – Схема электропривода ведущего колеса рассматриваемого автомобиля**

В статье [1] показана принципиальная возможность влиять на работу ЭТ путем регулирования величины тока фазы  $I_\phi$  за счет использования дополнительных корректирующих цепей в СУ, которую в сочетании с ними можно рассматривать как систему автоматического адаптивного управления (СААУ). В частности рассмотрен вариант СААУ, имитирующей действия идеального водителя, обеспечивающего при ограниченной величине потребляемой ЭТ мощности достижение заданной продольной скорости  $V_0$  движения исследуемого автомобиля.

На основании исследований в работе [1] сформулированы рекомендации по проектированию такой СААУ режимом работы ЭТ исследуемой машины, обеспечивающие заданные требования к работе шасси при трогании и разгоне. При этом СААУ ЭТ с периодичностью через каждые 0,1 секунды вычисляет необходимую в данный момент времени величину приращения тока фазы  $\Delta I_\phi$  в обмотках каждого ТЭД для достижения требуемой скорости  $V_0$  движения машины, по формуле:

$$\Delta I_\phi = k_V \cdot (V_0 - V_x) - k_a \cdot \dot{V}_x \quad (1)$$

где:  $V_0$  – скорость машины, которую стремится обеспечить водитель;

$V_x$  – скорость движения машины в данный момент времени;

$k_V$  – коэффициент, характеризующий чувствительность СУ ЭТ к сигналу рассогласования по величине скорости машины;

$\dot{V}_x$  – величина продольного ускорения машины;

$k_a$  – коэффициент обратной связи по ускорению машины.

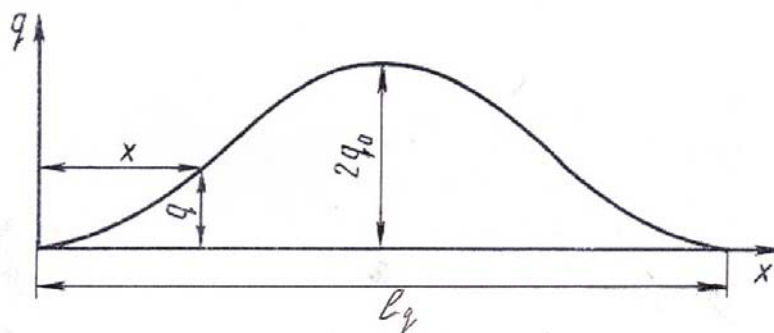
Анализ выражения (1) позволяет сделать вывод о том, что построенная в соответствии с ним СААУ может также выполнять функцию стабилизации продольной скорости движения рассматриваемого автомобиля в случае ее изменений, обусловленных влиянием внешних возмущений.

В предлагаемой статье излагаются результаты исследований, которые являются естественным продолжением тех, что приведены в работе [1].

Они посвящены анализу работы разрабатываемой СААУ в условиях переезда исследуемого автомобиля через единичное синусоидальное препятствие (рисунок 3), имеющее высоту  $2 \cdot q_0 = 20$  см и длину  $l_q = 1$  м.

Характер изменения рельефа (вертикальной координаты  $q(x)$ ), оказывающее возмущающее воздействие на колеса рассматриваемого транспортного средства при моделировании, для такого препятствия определяется выражением:

$$q = q_0 \cdot \left[ 1 - \cos \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l_q} \right) \right]. \quad (2)$$



**Рисунок 3 – Принятый профиль преодолеваемого единичного синусоидального препятствия**

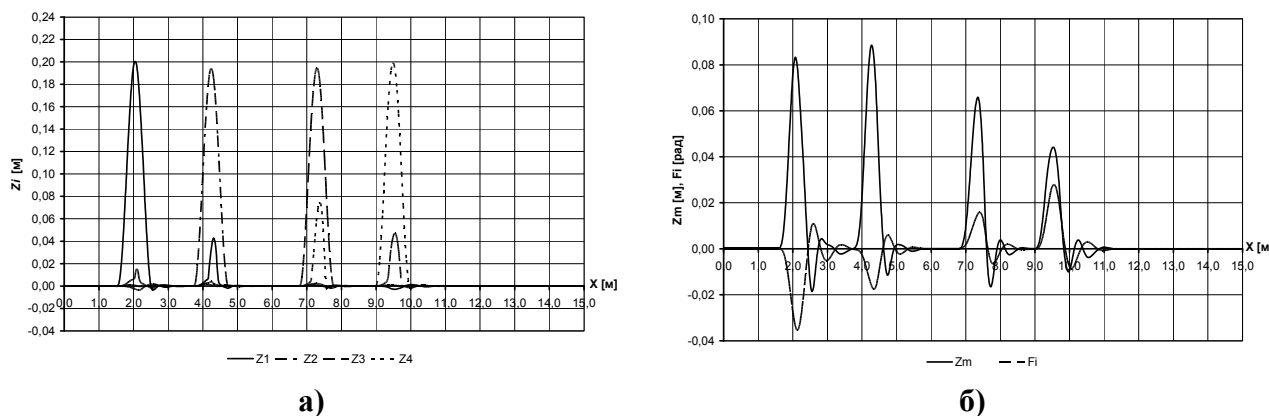
Целью этих исследований было выявление возможных негативных факторов в работе ЭТ и получение рекомендаций, которые необходимо учесть при проектировании СААУ, для повышения ее эффективности.

Для проведения этих исследований разработанная ранее математическая модель [1] дополнена соответствующими возможностями, основой для которых являются рекомендации, приведенные в работе [2].

Математическое моделирование переезда исследуемого автомобиля через принятое единичное синусоидальное препятствие проводилось при его движении на скорости 3,6 км/ч.

Результатом проведенного математического моделирования являются графики, приведенные на рисунках 4 и 5.

На рисунке 4 приведены графики, иллюстрирующие вертикальные перемещения центров колес  $z_i$  [м] (здесь и далее:  $i$  – номер оси автомобиля) каждой из осей автомобиля, центра масс его поддрессоренной части  $z_m$  [м], а также продольно-угловые клевки его остова  $Fi$  [рад], построенные в функции пути  $X$  [м], пройденном колесами передней оси автомобиля при переезде им через препятствие.



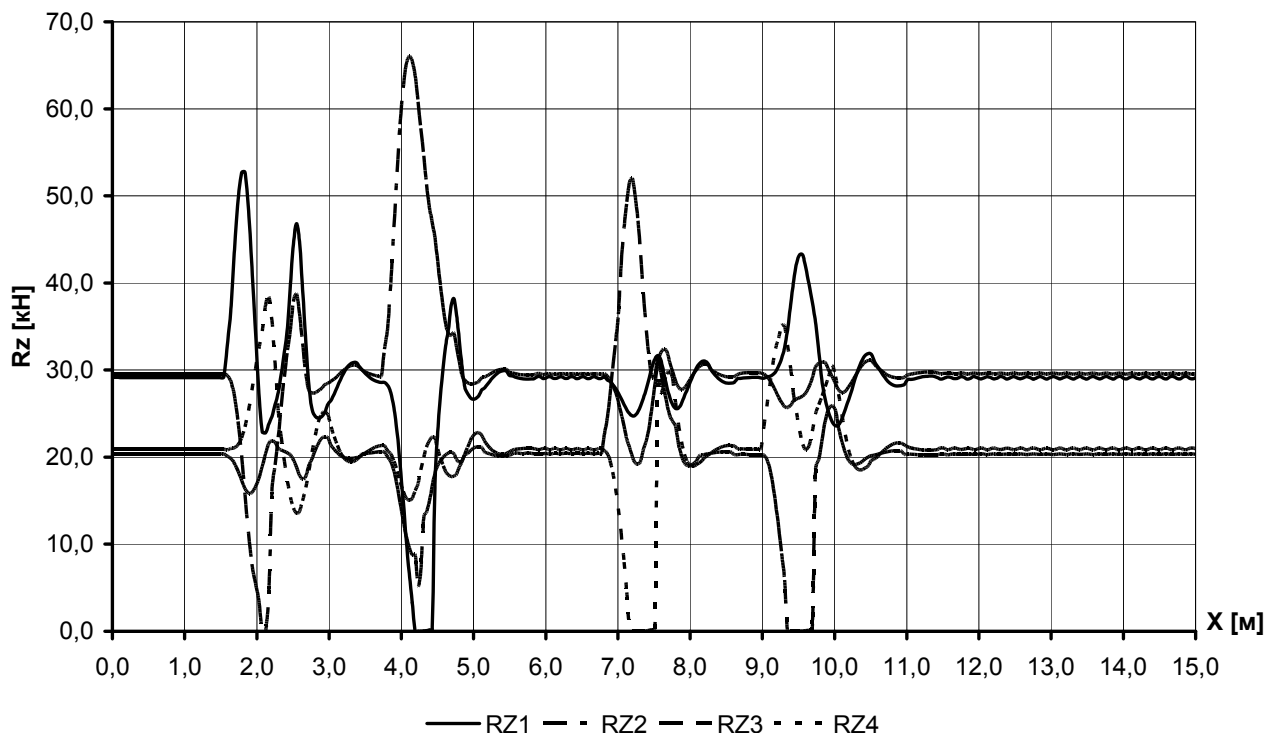
**Рисунок 4 – Вертикальные перемещения центров масс неподрессоренных ( $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ ) (а) и поддрессоренной ( $Z_m$ ) (б) частей, а также продольно-угловые клевки ( $Fi$ ) (б) остова автомобиля при переезде им через препятствие**

На рисунке 5 приведены соответствующие графики изменения вертикальных усилий  $R_{zi}$  [кН], возникающих в контакте эластичных колес каждой оси исследуемого четырехосного автомобиля с опорной поверхностью. На графике эти изменения также приведены в функции пути  $X$  [м], пройденном колесами передней оси этого автомобиля.

Следует отметить, что, в соответствии с принятыми начальными условиями, на ровной дороге распределение веса исследуемого автомобиля таково, что на две передние оси приходится  $\sim 120$  кН (на колесо  $\sim 30$  кН), а на две задние –  $\sim 80$  кН (на колесо  $\sim 20$  кН).

Из анализа графика на рисунке 4 следует, что при переезде автомобиля через принятое препятствие с продольной скоростью 3,6 км/ч вертикальная нагрузка на колеса второй оси

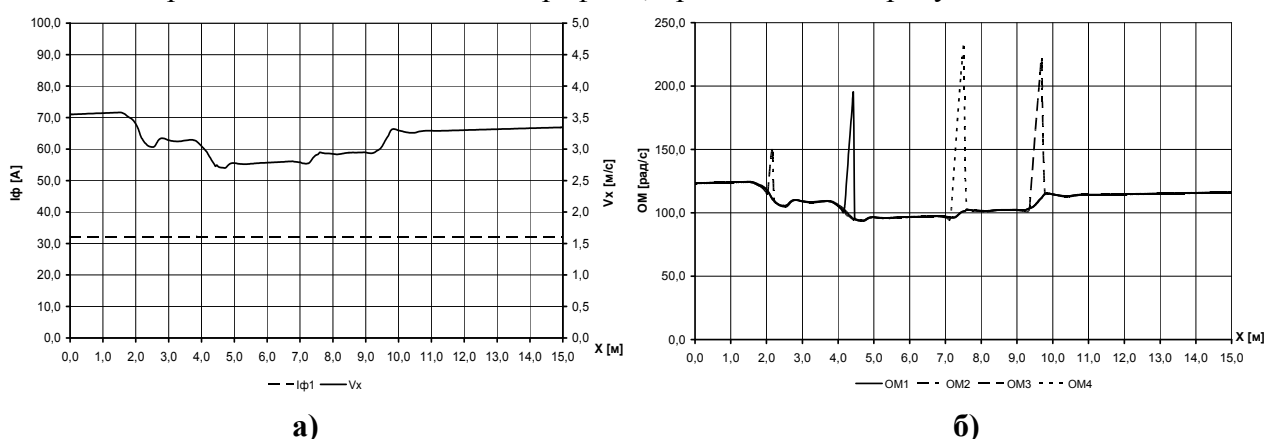
может достигать ~ 68 кН, а также в некоторые моменты колеса какой-то из осей разгружаются от вертикальной нагрузки полностью (происходит их отрыв от опорной поверхности). Очевидно, при этом существенно изменяются условия взаимодействия колес с опорной поверхностью, что не может не сказаться на работе ЭТ автомобиля.



**Рисунок 5 – Изменения вертикальных усилий  $R_{zi}$  [кН], возникающих в контакте эластичных колес каждой оси четырехосного автомобиля с опорной поверхностью, при переезде им через препятствие**

Кроме этого принятое препятствие создает для рассматриваемого автомобиля дополнительное сопротивление движению, которое обуславливает изменение величины его продольной скорости  $V_x$ .

Подтверждением этого являются графики, приведенные на рисунке 6.



**Рисунок 6 – Движение без использования системы стабилизации продольной скорости**

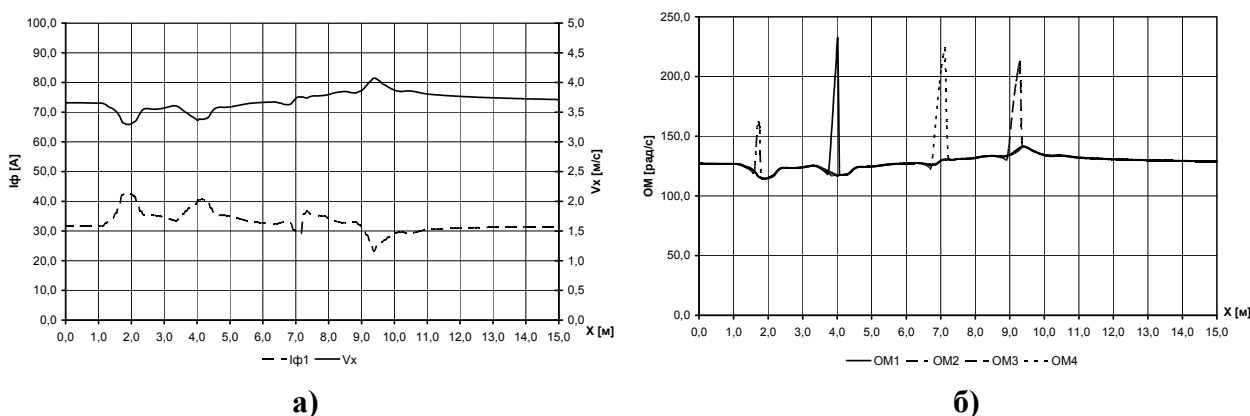
Мы видим из графика, приведенного на рисунке 6а, что возросшее сопротивление движению автомобиля вызвало существенное (более чем на 20%) снижение величины его продольной скорости  $V_x$ .

Эти графики получены при моделировании рассматриваемого случая движения автомобиля при неизменном значении тока фазы  $I_\phi$  в обмотках ТЭД (см. рисунок 6а). Такой ва-

риант работы СААУ возможен, если система стабилизации продольной скорости  $V_x$  при моделировании не используется.

Из графика на рисунке 6б видно, что изменение угловой скорости  $OM_i$  вращения ведущих колес автомобиля в большинстве случаев повторяет характер изменения  $V_x$ . Исключением являются моменты, в которые происходит отрыв соответствующего колеса от опорной поверхности. Из графика видно, что в зависимости от продолжительности этого отрыва происходит разная по своей интенсивности раскрутка колеса. Так, колеса четвертой оси при этом приобретают частоту вращения, почти в 2 раза превышающую частоту, необходимую для движения автомобиля с заданной скоростью  $V_0$ . При этом, как показывают результаты исследований, не только непроизводительно растрачивается энергия, реализуемая через ЭТ для движения автомобиля, но и происходит повышенный износ шин. Он обусловлен повышенным буксованием раскрученного ведущего колеса, возникающим в момент его контакта с опорной поверхностью.

Для сравнения на рисунке 7 приведены графики, аналогичные графикам на рисунке 6, полученные в тех же условиях, но при работающей системе стабилизации продольной скорости  $V_x$  движения исследуемого автомобиля. В данном случае при моделировании в СААУ ЭТ реализован закон управления величиной тока фазы  $I_\phi$  в обмотках ТЭД всех ведущих колес автомобиля в соответствии с выражением (1).



**Рисунок 7 – Движение с использованием системы стабилизации продольной скорости автомобиля**

В качестве примера на рисунке 7а приведен график, характеризующий изменение величины тока фазы  $I_{\phi_1}$  в обмотках ТЭД ведущих колес передней оси рассматриваемого автомобиля (характер изменения величины тока фазы  $I_{\phi_i}$  в обмотках ТЭД ведущих колес других осей рассматриваемого автомобиля аналогичен). Результатом этого является существенное уменьшение степени снижения величины продольной скорости  $V_x$  автомобиля по сравнению с тем, что получалось без использования системы стабилизации (см. рисунок 6а). Однако использование такой системы управления не оказало существенного влияния на процессы раскрутки ведущих колес автомобиля в моменты их отрыва от опорной поверхности (см. рисунок 7б) и связанные с ними негативные явления, отмеченные выше. В связи с этим были проведены дополнительные исследования по модернизации закона управления, используемого в СААУ.

При этой модернизации учитывалось, что закон управления для каждого ведущего колеса должен быть индивидуален, учитывающий условия работы именно этого колеса в данный момент времени.

Поэтому, во-первых, в закон управления следует включить коррекцию управляющего сигнала (величины тока фазы  $I_{\phi_i}$  в обмотке  $i$ -ого ТЭД) по величине отклонения частоты  $\omega_i$

вращения данного ведущего колеса от необходимой величины, обусловленной значением продольной скорости  $V_x$  движения автомобиля. Так как контроль реальной продольной скорости автомобиля и определение по ней требуемой частоты вращения ведущего колеса в общем случае его качения весьма затруднен, то в качестве базового значения угловой скорости ведущих колес предлагается использовать среднее значение частоты  $\omega_{cp}$  вращения колес автомобиля в данный момент времени. Кроме этого, учитывая инерционность рассматриваемой системы управления частотой вращения ведущего колеса, для повышения ее устойчивости и уменьшения величины перерегулирования, рекомендуется в СААУ использовать дополнительный контур управления, обеспечивающий слежение за величиной углового ускорения  $\dot{\omega}_i$  соответствующего ведущего колеса.

Во-вторых, предлагается при формулировании закона управления учесть изменение в процессе движения величины нормального усилия  $R_{zi}$  в контакте ведущего колеса с опорной поверхностью. Сигнал о величине этого параметра, характеризующего условия работы ведущего колеса, раньше других позволяет оценить их изменение [3], а значит подготовить СААУ к ним. Кроме этого, коррекция управляющего сигнала СААУ по величине нормального усилия  $R_{zi}$  в контакте ведущего колеса с опорной поверхностью уменьшает величину пробуксовки данного ведущего колеса.

Исходя из этого, для использования в СААУ был предложен следующий вариант закона регулирования:

$$I_{\phi_i} = I_{\phi} \cdot \frac{R_{zi}}{R_{zcp}} - k_{\omega} \cdot (\omega_i - \omega_{cp}) - k_{\varepsilon} \cdot \dot{\omega}_i \quad (3)$$

где:  $I_{\phi_i}$  – величина тока фазы в обмотке  $i$ -ого ТЭД;

$I_{\phi}$  – необходимая величина тока фазы в данный момент времени, заданная водителем или вычисленная с учетом формулы (1);

$R_{zi}$  – нормальное усилие в контакте  $i$ -ого ведущего колеса с опорной поверхностью;

$R_{zcp}$  – средняя величина нормального усилия в контакте колес с опорной поверхностью;

$\omega_i$  – частота вращения  $i$ -ого ведущего колеса;

$\omega_{cp}$  – среднее значение частоты вращения колес автомобиля;

$k_{\omega}$  – коэффициент, характеризующий чувствительность СААУ ЭТ к величине отклонения частоты вращения ведущих колес машины от среднего значения;

$\dot{\omega}_i$  – величина углового ускорения  $i$ -ого ведущего колеса;

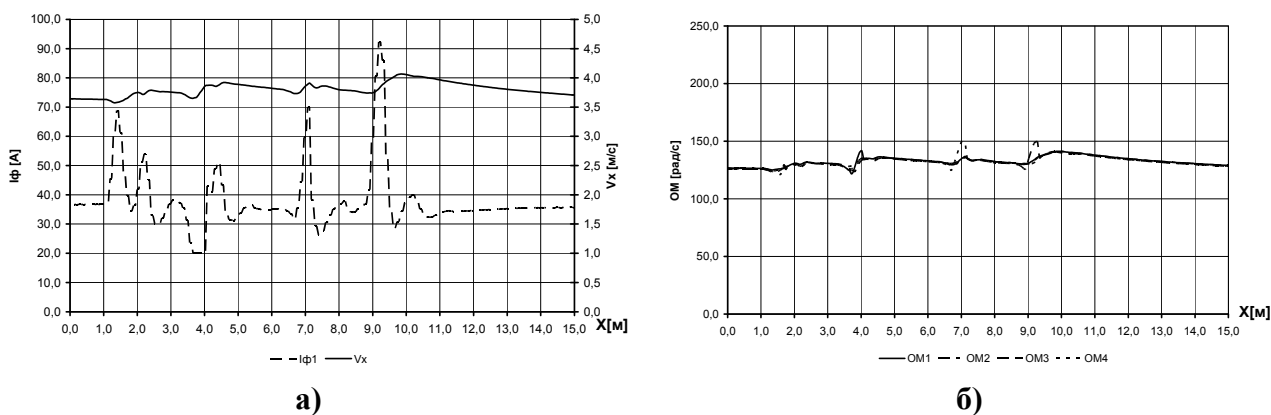
$k_{\varepsilon}$  – коэффициент обратной связи по величине углового ускорения ведущего колеса.

На рисунке 8 приведены графики, аналогичные графикам на рисунке 7, полученные в тех же условиях при работающей модернизированной системе стабилизации продольной скорости  $V_x$  движения исследуемого автомобиля, построенной с использованием в ней закона регулирования вида (3).

На графике, приведенном на рисунке 8а, показан, кроме графика изменения величины продольной скорости  $V_x$  движения рассматриваемого автомобиля, график, характеризующий изменение величины тока фазы  $I_{\phi_1}$  в обмотках ТЭД ведущих колес передней оси рассматриваемого автомобиля. Следует отметить, что графики, характеризующие изменение величины тока фазы  $I_{\phi_i}$  в обмотках ТЭД ведущих колес других осей рассматриваемого автомобиля, существенно отличаются от приведенного.

Результатом использования модернизированного закона регулирования СААУ является

не только уменьшение степени снижения величины продольной скорости  $V_x$  автомобиля по сравнению с тем, что получалось без использования системы стабилизации (см. рисунок 8а), а и существенное уменьшение раскрутки ведущих колес автомобиля в моменты их отрыва от опорной поверхности (см. рисунок 8б). Очевидно, что при этом в меньшей степени будут сказываться и связанные с ними негативные явления, отмеченные выше.



**Рисунок 8 – Движение с использованием системы стабилизации продольной скорости автомобиля, снабженной дополнительной коррекцией по формуле (3)**

На основании полученных результатов исследований разработаны способ автоматического адаптивного управления бесступенчатой трансмиссией многоприводного транспортного средства [4] и устройство автоматического адаптивного управления бесступенчатой электрической трансмиссией многоприводного колесного транспортного средства [5], на которые получены соответствующие патенты РФ.

#### Выводы

Таким образом, предложенный закон регулирования СААУ в форме выражения (3) позволяет решить задачу повышения эффективности работы рассматриваемого автомобиля с ЭТ индивидуального привода его ведущих колес в условиях переезда им через единичное синусоидальное препятствие, а также в других подобных случаях эксплуатации.

#### Литература

1. Кулаков Н.А., Лепешкин А.В., Черанев С.В. Разработка и исследование математической модели полноприводного четырехосного автомобиля с электротрансмиссией. М., МАМИ. Научный рецензируемый журнал Известия МГТУ «МАМИ», № 2 (12), 2011. с. 95-105.
2. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. М., «Машиностроение», 1972, 392 с.
3. Лепешкин А.В. Методика разработки СААУ трансмиссий многоприводных колесных машин. Монография. Издательство «LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG» (Германия). 2011. 102 с. ISBN 978-3-8454-3161-1.
4. Патент РФ на изобретение № 2397893 от 27.08.2010. Способ автоматического адаптивного управления бесступенчатой трансмиссией многоприводного транспортного средства. Авт.: С.В. Бахмутов, А.В. Лепешкин, С.Б. Шухман.
5. Патент РФ на изобретение № 2397088 от 20.08.2010. Устройство автоматического адаптивного управления бесступенчатой электрической трансмиссией многоприводного колесного транспортного средства. Авт.: С.В. Бахмутов, А.В. Лепешкин, Н.А. Кулаков.

#### **Имитационное моделирование работы АБС на основе квазипространственной динамической модели автомобиля**

к.т.н. доц. Лата В.Н., к.т.н. доц. Соломатин Н.С., к.т.н. Окунев А.П., к.т.н. Еремина И.В.,  
Ермолин А.В.

Тольяттинский государственный университет  
+7-8482-53-92-59, [ait@tltsu.ru](mailto:ait@tltsu.ru)

*Аннотация.* Рассмотрены вопросы моделирования работы антиблокировоч-