электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

 # 01, январь 2016

УДК 629.3

Разработка автоматической системы управления, измерения и контроля параметров физической модели автомобиля с электромеханической трансмиссией на поверхностях, покрытых слоем льда

Румянцев Е.О., *аспирант*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Колесные машины»

Мыльников В.В., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Колесные машины»

Медведев В.О., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»

Соломатина Д.И., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»

Научные руководители: Купреянов А.А., к.т.н., доцент,
Загидуллин Р.Ш., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
kafsm10@sm.bmstu.ru

Возможность реализации достаточно больших продольных реакций в контакте автомобильных шин с опорной поверхностью определяют тягово-сцепные и тормозные свойства автомобиля, как на твердых опорных поверхностях, так и при движении автомобиля по грунтам. При движении автомобиля по твердым поверхностям возможность реализации максимальных продольных реакций определяется в свою очередь возможностью реализации сил трения в контакте. При взаимодействии автомобильных колес с грунтом продольные реакции будут во многом зависеть от различных характеристик грунта.

Продольные реакции в контакте шин с опорной поверхностью определяют в свою очередь характеристики опорной проходимости (в частности предельный угол подъема),

минимальный тормозной путь и динамику разгона автомобиля. Следует отметить, что при решении вопроса о возможности реализации максимальных сил трения при движении автомобиля по твердой опорной поверхности необходимо учитывать особенности контактного взаимодействия эластомера (слоя протекторной резины) с твердой опорной поверхностью (сухой, мокрой, загрязненной). С позиции современной трибологии реализуемые силы трения в контакте зависят от текстуры поверхности, номинального давления, скорости скольжения и температуры. Это подтверждается и теоретическими и экспериментальными исследованиями [1], [2].

При необходимости оценки управляемости и устойчивости автомобиля, а также для создания антиблокировочных и противобуксовочных систем используется так называемая φ(S)-диаграмма. При отсутствии боковых реакций в пятне контакта рассматривается $\varphi_x(S_x)$-диаграмма , где $\varphi_x = \frac{R_x}{R_z}$ - коэффициент продольной реакции, R_x - продольная реакция в пятне контакта, R_z - нормальная реакция в контакте.

$$S_x = \frac{V_s}{V_x}, \tag{1}$$

где S_x – коэффициент скольжения, V_x - составляющая скорости автомобиля в направлении оси X в момент начала торможения.

На рис. 1 показан характерный вид диаграммы $\varphi_x = f(S_x)$.

Для получения такой диаграммы используются математические модели различной степени сложности. В математических моделях высокого уровня [3], [4] шина рассматривается как многослойная, геометрически нелинейная оболочка. Вместе с тем учет сил трения в контакте в этих работах сводится к простейшим моделям трения (модели Кулона). При этом в зоне контакта шины с опорной поверхностью существует зона сцепления и зона скольжения. При увеличении продольной реакции R_x зона сцепления уменьшается, зона скольжения растет, постепенно охватывая весь контакт.

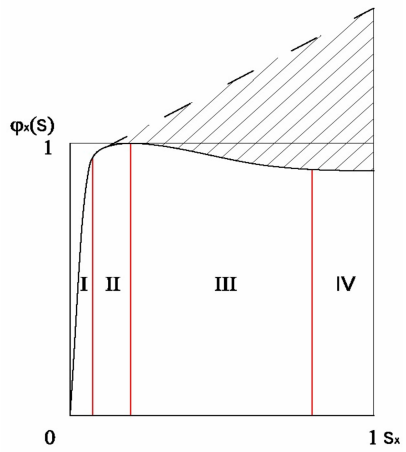


Рис. 1. φ(s)-диаграмма

В зоне $S_x \geq S_{кр}$, где $S_{кр}$ – точка максимума на диаграмме (см. рис.1), все точки шины в контакте имеют практически одинаковую скорость скольжения.

Условно можно считать, что на рис. 1 в зоне I присутствует только область сцепления (кроме задней границы), в зоне II зона скольжения постепенно растет, охватывая весь контакт. В зоне III реакция R_x несколько уменьшается, а в зоне IV она стабилизируется.

На рис. 2 показаны диаграммы $\varphi_x(S_x)$ на различных поверхностях.

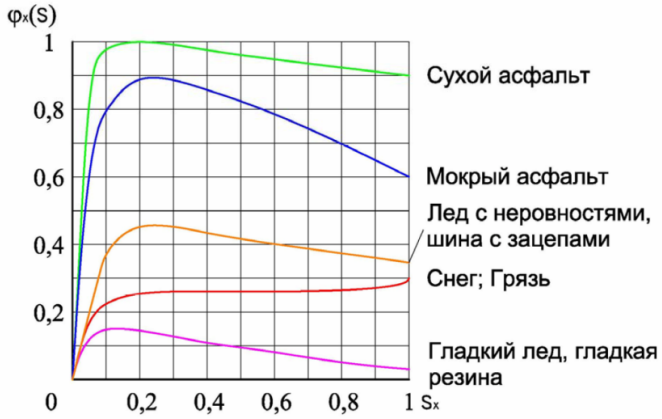


Рис. 2. Диаграммы $\varphi_x(S_x)$ на разных поверхностях

В первом приближении можно считать, что при $S_x \geq S_{кр}$ величина продольной реакции определяется только трибологическими характеристиками контакта шины с дорогой.

Существуют методики позволяющие построить диаграмму $\varphi_x = f(S_x)$ в условиях лабораторных или дорожных испытаний. Отметим еще одно важное обстоятельство. Указанные методики построения и использования φ(S)-диаграммы для создания антиблокировочных и противобуксовочных систем предполагают наличие стационарных процессов. Вместе с тем в научной литературе приведены данные [5], которые показывают, что даже на сухом асфальтобетонной поверхности диаграмма φ(S), построенная по "мгновенным" значениям кинематических и силовых параметров в реальных условиях отличается от стационарной диаграммы φ(S).

При этом на начальном этапе торможения имеются пиковые забросы величины продольной реакции. Кроме того в процессе экспериментальных исследований установлено, что указанная диаграмма имеет большое различие в тяговом и тормозном режимах и вид диаграммы существенно изменяется при изменении начальной скорости автомобиля в момент начала торможения.

В работах [2], [5] по результатам теоретических и экспериментальных исследований показано существенное влияние температурных полей при качении шины в различных режимах на реализуемую силу трения в контакте и вид диаграммы $\varphi_x = f(S_x)$.

Следует заметить, что влияние нестационарности процессов нагружения крутящим моментом проявляется на различных дорожных поверхностях. Особый интерес представляет взаимодействие автомобильных шин с поверхностями, покрытыми слоем льда.

При этом в работе [6] зафиксирован так называемый эффект "*DTFP*" (*dynamic tire friction potential*). Этот эффект проявляется при изменении скорости нагружения ведущего колеса крутящим моментом на ледяной поверхности.

На представленной выше диаграмме φ(S) (см. рис. 1), условно выделена заштрихованная область, которая показывает наличие у шин динамического потенциала по улучшению тягово-сцепных свойств шины, который может быть реализован в случае применения специального алгоритма управления подводимым к колесу крутящим моментом.

Целью представленной работы является разработка методов улучшения тягово-сцепных свойств автомобиля на поверхностях, покрытых слоем льда.

Задачи работы были следующие:

1. Произвести обзор и анализ научно-технической литературы по возможностям использования динамического потенциала шин на поверхностях, покрытых слоем льда.

2. Выполнить экспериментальные исследования характеристик пары трения «эластомер-лед» в стационарных и нестационарных условиях на триботехнической установке УТУ-3.

3. Произвести предварительный выбор алгоритма управления крутящими моментами, подведенными к колесам автомобиля.

4. Разработать математическую модель для имитации движения автомобиля, с электромеханической трансмиссией, в которой предусмотрена возможность импульсного управления крутящим моментом.

5. Разработать и реализовать систему управления, измерения и контроля масштабных моделей автомобиля.

6. Произвести экспериментальные исследования различных физических масштабных моделей автомобиля с электромеханической трансмиссией, в которых предусмотрена возможность изменения некоторых параметров.

7. Произвести тестирование различных режимов и проанализировать потенциальные возможности различных методов улучшения тягово-сцепных свойств автомобиля на ледяной поверхности.

Как видно из поставленных целей и задач в представленной работе предполагается детально исследовать взаимодействие автомобильных шин с поверхностями, покрытыми слоем льда. Исследование взаимодействия шины со льдом представляет особый интерес, так как движение автомобиля именно по ледяной поверхности часто сопровождается многочисленными авариями. Особенно опасные ситуации возникают на дорогах поздней осенью и ранней весной, когда температура ночью меньше нуля, а днем больше нуля. Тонкий слой воды на поверхности льда усугубляет ситуацию. Даже при попытке преодоления автомобилем подъема с малой скоростью может произойти потеря подвижности автомобиля, возникают «пробки» и многочисленные аварии. Еще более опасная ситуация возникает, когда автомобиль въезжает на эстакаду, двигаясь по криволинейной траектории.

Одним из способов борьбы с подобными явлениями является использование шипованных или нешипованных зимних шин. Эффективность тех или иных шин зависит от конкретных погодных условий.

По мнению многочисленных исследователей и испытателей зачастую зимние шины с «отсосом» воды из зоны контакта (например, фирмы Бриджстоун) оказываются более эффективными, чем шины с шипами. За рубежом в ряде стран таких как США, Канада,

Швеция, Финляндия, Норвегия придается очень большое значение исследованию сцепляемости шин в зимних условиях. Можно назвать несколько крупных исследовательских центров, а именно «Лаборатория США по проектированию и исследованию холодных регионов», «Институт по исследованию снега Мичиганского технологического университета» и т.д.

Созданы специальные установки и лаборатории для изучения трибологических характеристик на льду, такие как установка UG для качественного определения сил трения и для обеспечения сцепляемости в зимних условиях, установка фирмы SAAB для оценки сил трения для обеспечения безопасности посадки самолета на поверхность взлетной полосы, установка CIV – испытательно-измерительная установка, лаборатория армии США по проектированию и исследованию холодных регионов.

На рис. 3 представлены экспериментальные данные, полученные при тормозных испытаниях автомобиля на льду с зимними нешипованными и шипованными шинами.

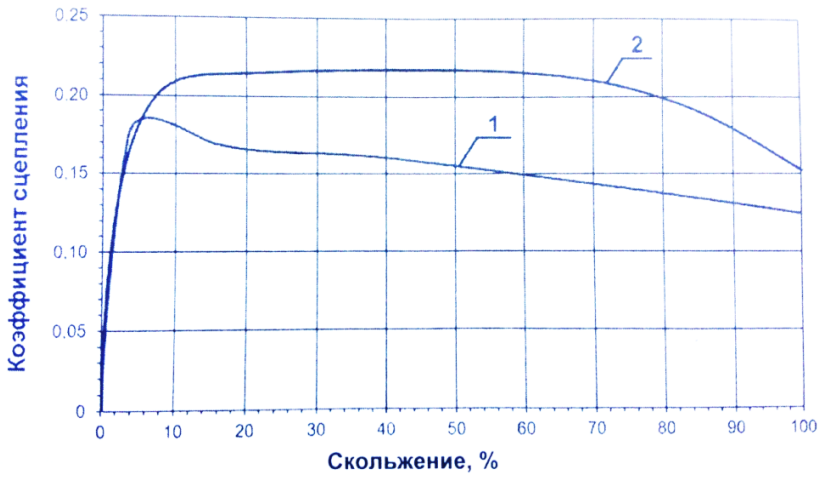


Рис. 3. Коэффициент сцепления на льду:
1 – для нешипованной шины; 2 – для шипованной

Из этих данных видно, что максимальное значение коэффициента сцепления (коэффициента продольный реакции) для шипованных шин на 15 ... 25% выше, чем для нешипованных [8].

Отметим, тем не менее, эффективность зимних шин различной конструкции сильно зависит от состояния льда и температуры окружающей среды, можно утверждать, что в

определенных случаях эффективность нешипованных шин с "отсосом" воды из зоны контекста может оказаться выше, чем шипованных.

Как отмечалось ранее в ряде работ описан эффект "DTFP" на поверхности, покрытой слоем льда. На рис. 4, взятом из статьи В. Ивановича [6] представлены результаты экспериментальных исследований.

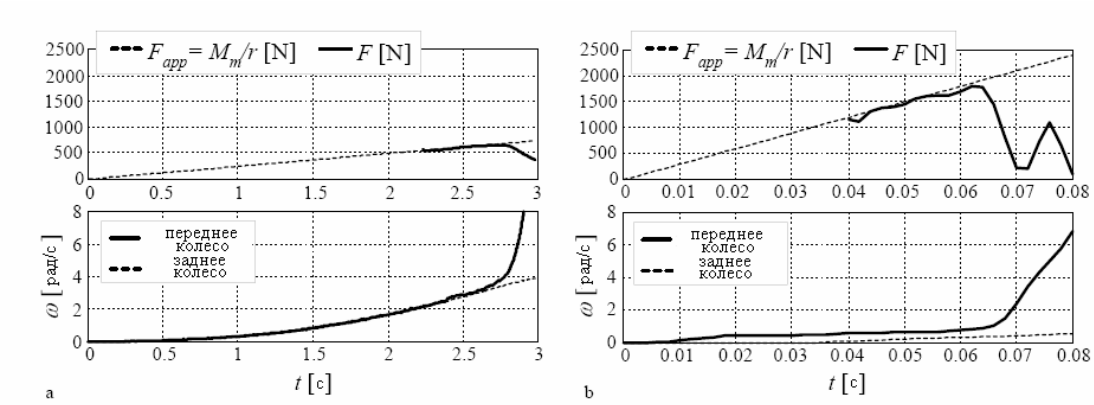


Рис. 4. Данные из статьи В. Ивановича

На рис. 4 показаны графики изменения тяговой силы и угловых скоростей ведущих и ведомых колес модели автомобиля с электромеханической трансмиссией при трогании автомобиля на льду при различной скорости нарастания подводимого к колесам крутящего момента (до "срыва" контакта). Как видно из рис. 4 при плавном трогании время достижения максимума тяговой силы 2,7 с, при резком трогании 0,065 с. Отметим, что реализуемый максимальный крутящий момент и максимальная тяговая сила на колесе при большей скорости нагружения увеличивается почти в три раза.

После "срыва " контакта и интенсивного пробуксовывания колеса, и в том и в другом случае проходит резкое падение крутящего момента и тяговой силы. Во втором случае момент уменьшается практически до нуля, резко возрастает угловая скорость колеса и уменьшается поступательная скорость автомобиля.

Именно по этой причине водители на поверхностях, покрытых слоем льда или загрязненных и имеющих малый коэффициент сцепления пытаются плавно увеличивать подводимый к колесам крутящий момент при начале движения автомобиля.

Мнение исследователей относительно причин эффекта «DTFP» [6] сводится к тому, что при «медленном» нагружении контакт, в котором существенную роль играет образуемая

водная пленка, активно разрушается, а при «быстром» процесс разрушения контакта замедляется.

Кроме того зафиксировано влияние на максимальную реализуемую продольную реакцию при взаимодействии автомобильного колеса с поверхностью, покрытой слоем льда спустя промежуток времени, прошедшего после приложения к колесу вертикальной нагрузки до начала возрастания крутящего момента. Авторы назвали это явление «эффектом примерзания».

Для проверки и попытки обобщения описанных эффектов на установке УТУ-3 была проведена серия специальных экспериментов в стационарных и нестационарных режимах. Общий вид установки показан на рисунке 5.

Рис. 5. Общий вид установки УТУ-3

На установке можно исследовать трение и износ. Установка работает по схеме: «палец-диск». Исследовалось трение пары: «эластомер – ледяная поверхность». Далее в стационарных условиях производилась запись процессов изменения параметров (силы трения, температура и частоты вращения диска).

Измерения производится для ряда дискретных значений нормальной нагрузки N_i, номинального давления p_{a_i} и частоты вращения рабочего стола n_i.

Кроме испытаний в стационарных условиях были приведены специальные испытания при изменении темпа нарастания подводимого момента и реализуемой силы трения в контакте.

Рис. 6. Установка УТУ-3 с установленным образцом ледяной поверхности

Ниже приведены некоторые результаты выполненных экспериментов.

Данные в таблице показывают влияние частоты вращения рабочего стола и скорости скольжения в контакте на реализуемую силу и коэффициент трения при нагрузке 39 Н.

Скорость скольжения, рад/с	Среднее значение силы трения, F, Н	Среднее значение коэффициента трения, μ
0,1	11	0,282
0,2	7,5	0,192
0,3	6	0,154
0,5	5	0,128
0,8	3,5	0,09
1,0	3,0	0,077

В качестве примера на рисунке 7, 8 приведены сравнительные данные, по изменению силы трения в контакте при плавном и среднем темпе нарастания тангенциальной силы.

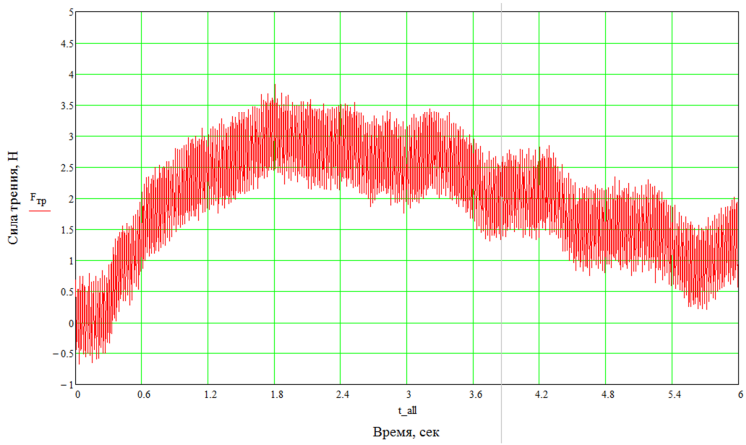


Рис. 7. Изменение силы трения в контакте при плавном темпе нарастания тангенциальной силы

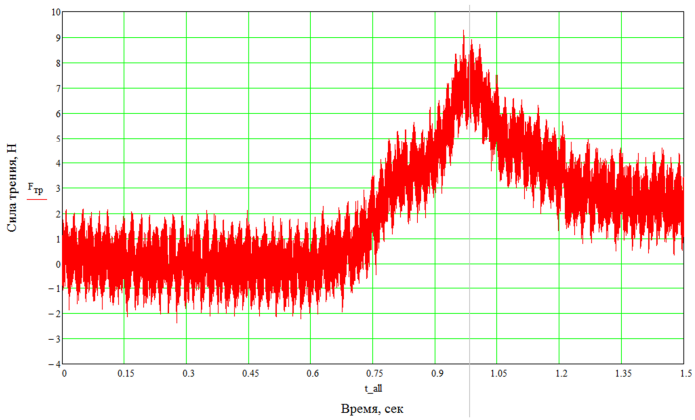


Рис. 8. Изменение силы трения в контакте при среднем темпе нарастания тангенциальной силы

На рис. 9 приведены данные зависимости максимальной реализуемой силы трения в контакте пары: «эластомер – лед» в зависимости от log V_f, где V_f - скорость нарастания силы трения в контакте, Н/с при значениях нормальной нагрузки N: $N1$=39 Н, $N2$=56,5 Н и $N3$=74,3 Н, что соответствует значениям реализуемого давления P: $P1$=0,497 МПа, $P2$=0,720 МПа, $P3$=0,946 МПа.

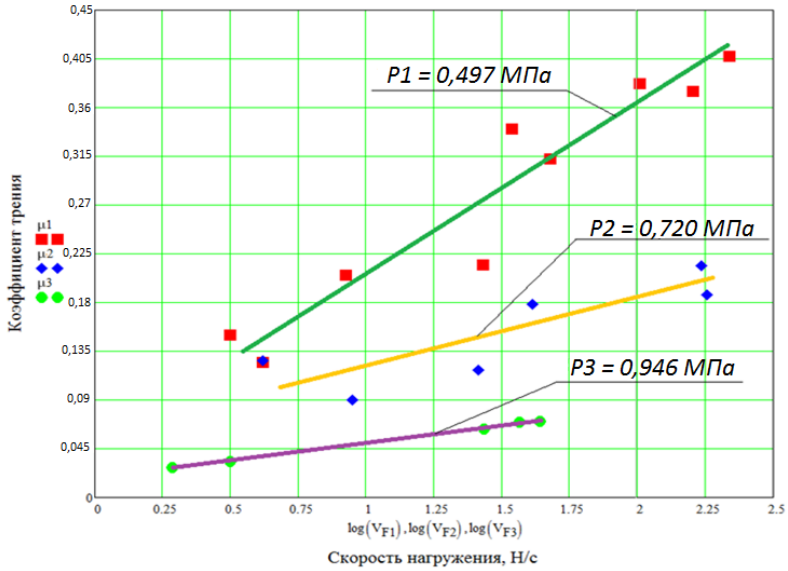


Рис. 9. Результаты экспериментальных исследований пары: «эластомер – лед» при изменении скорости нагружения

Как видно из рисунка 9 для каждого значения нормальной нагрузки N реализуемая продольная реакция F существенно зависит от скорости нарастания силы трения в контакте.

По результатам экспериментальных исследований на установке УТУ-3 можно отметить следующее:

– в стационарных условиях при увеличении скорости скольжения существенно уменьшается сила и коэффициент трения; По-видимому, это связано с нагревом контакта и интенсивным образованием водяной пленки;

– в стационарных и нестационарных условиях с ростом нормальной нагрузки и номинального давления в контакте сила и коэффициент трения также уменьшаются (см. рис. 9). Это также связано с более интенсивным нагревом контакта и образованием водяной пленки;

– при одной и той же интенсивности темпа нарастания тангенциальной нагрузки увеличение интервала времени от приложения нормальной нагрузки до приложения тангенциальной силы реализуемая сила и коэффициент трения в контакте возрастают;

– при отсутствии этого интервала времени сила трения составила 7,5 Н (μ=0,192);

– при задержке 30 секунд – 11Н (μ=0,282);

– при задержке 60 секунд – 16Н (μ=0,41).

Можно сделать предварительный вывод о том, что момент начала пробуксовывания колеса на льду имеет предельные значения, возрастающие с ростом скорости приложения крутящего момента и интервала времени от приложения нормальной нагрузки до начала возрастания тангенциальной силы.

По-видимому, можно увеличить максимальную силу трения в контакте шины с поверхностью, покрытой слоем льда при пульсации подводимого к колесу крутящего момента с заданной частотой и ограниченной для заданной частоты амплитудой крутящего момента.

Реализовать такую пульсацию для традиционного двигателя и механической трансмиссии достаточно сложно. Тем не менее, возможно использование для этих целей, например, кулачкового дифференциала (рис.10) [8].

Применение такого дифференциала при движении автомобиля по пересеченной местности может увеличить проходимость автомобиля в сложных дорожных условиях. Возможны и другие конструктивные решения.

Однако гораздо большие возможности для улучшения тягово-сцепных свойств колеса на поверхности льда могут быть реализованы в случае применения электромеханической или гибридной трансмиссии.

В этом случае существует реальная возможность управления подводимым к колесу крутящим моментом и в перспективе создания адаптивной системы, позволяющей непрерывно изменять некоторые параметры при изменении свойств опорной поверхности с целью улучшения тягово-сцепных свойств автомобильного колеса.

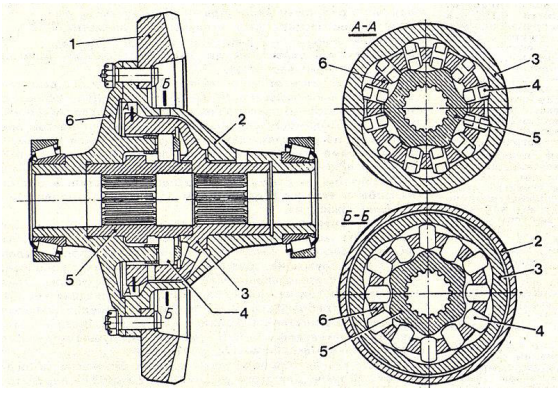


Рис. 10. Схема пульсирующего дифференциала: 1 — ведомая шестерня; 2 — коробка дифференциала; 3 — шлицевая обойма правой полуоси; 4 — сухарик; 5 — шлицевая обойма левой полуоси; 6 — крышка коробки дифференциала

Ниже показана принципиальная возможность улучшения тягово-сцепных свойств автомобильного колеса и всего автомобиля за счет изменения закона управления подводимого к колесу крутящего момента.

При попытке преодоления заданного угла подъема автомобилем крутящий момент может достичь некоторого значения M_0. Это предельное значение момента соответствует предельному углу подъема α_{max} на поверхности, покрытой слоем льда рис. 11.

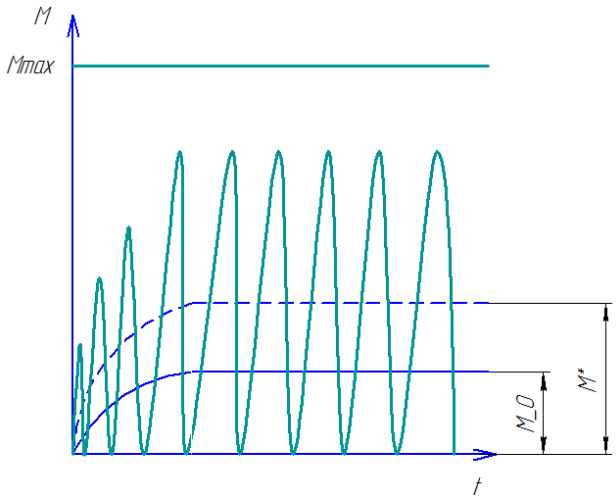


Рис. 11. Предполагаемый закон подведения момента

Если на этот процесс изменения подводимого момента наложить гармонические колебания с заданного частотой, предельный угол подъема может быть увеличен. Действительно в определенные моменты времени предельная величина «мгновенного крутящего момента» (в зависимости от заданной частоты) может существенно возрасти за счет эффекта DTFP. Более того, математическое ожидание подводимого крутящего момента M* также возрастет. При этом существенно возрастет и предельный угол подъема на данной поверхности, $M^*>M_0$ *и* $\alpha^*_{max}>\alpha^0_{max}$.

Реализация подобного алгоритма для реальных конструкций автомобиля зависит от типа и конструкции электродвигателя и преобразователя.

Для проверки принципиальной возможности улучшения тягово-сцепных свойств автомобиля на ледяной поверхности за счет управления крутящим моментом было принято решение провести экспериментальные исследования на масштабных моделях автомобилей с электромеханической трансмиссией.

В качестве первой модели была выбрана модель колесной машины, выполненная в масштабе 1/16 – Traxxas E-Revo. Данная модель является полноприводной с колесной формулой 4х4. Движение модели осуществляется за счет электродвигателя коллекторного типа, который через зубчатые зацепления и карданные валы передает момент на ведущие колеса. Общий вид автомобиля представлен на рис. 12.

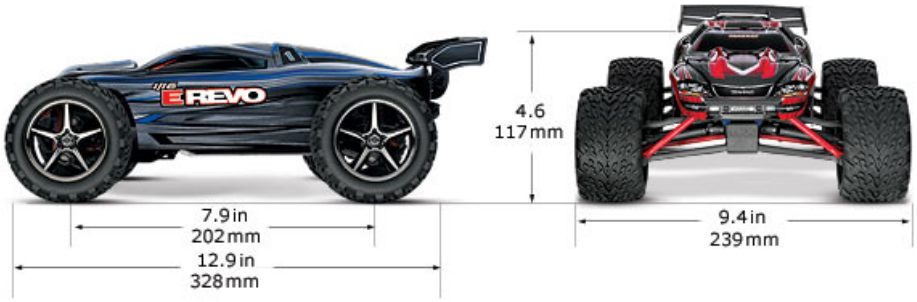


Рис. 12. Модель Traxxas E-Revo 1/16

Была проведена модернизация модели. Предусмотрена возможность применения шин различной конструкции и различной радиальной жесткости.

Разработана система управления подводимыми к колесам крутящими моментами за счет изменения подводимого к электродвигателю напряжения.

Создан стенд с переменным углом подъема и сменным покрытием, позволяющий производить экспериментальные исследования различных масштабных моделей в различных режимах движения. Для тестирования масштабных моделей в различных режимах движения была разработана математическая модель, которая приближенно описывает процессы в электромеханической системе представленной на рис.13-14.

Таким образом, с учетом допущения математическая модель автомобиля описывается следующими уравнениями при движении:

$$\frac{G_a}{g}\frac{dV_x}{dt} = \frac{M_{gb}(t) i_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}}}{r} - \frac{\sum M_{fi}}{r} - G_0 \sin\alpha \qquad (2)$$

$$U = U(t) \qquad U = U_{gl} + J_A \cdot R_g \qquad (3)$$

$$M_{дв} = K\Phi J_я \eta_{эм}(U_{дв}),\ \varpi_{дв} = \frac{U_{дв}(t) - J_я R_я}{K\Phi}\ , \qquad (4, 5)$$

где G_a – вес автомобиля (модели);

V_x – проекция скорости автомобиля на ось X;

$i_{тр}$ – передаточное число трансмиссии;

δ – коэффициент, учитывающий вращающиеся массы;

U(t) – задаваемое напряжение;

r – радиус колеса.

$\eta_{эм} = \eta(U)$ – коэффициент полезного действия электродвигателя в зависимости от подводимого напряжения.

Система уравнений (2 – 5) записана для движения по горизонтальной поверхности или при движении на подъем.

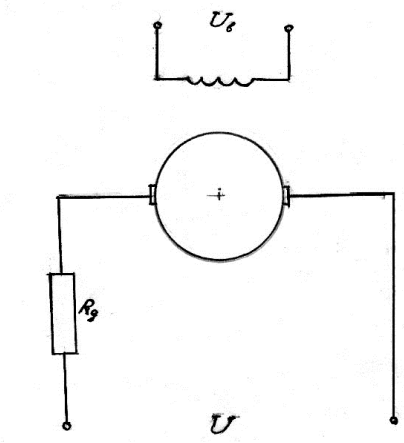


Рис. 13. Электродвигатель постоянного тока

$$\sum_{i=1}^{n} M_{fi} = G_a f_a r$$

$\sum_{i=1}^{n} M_{fi}$ - суммарный момент сопротивления качению.

$\varpi_{дв}$ – угловая скорость вала двигателя;

$J_{я}$ – сила тока якоря;

Ф – магнитный поток.

$$V_x = \frac{\varpi_{дв}}{i_{тр}} \cdot r$$

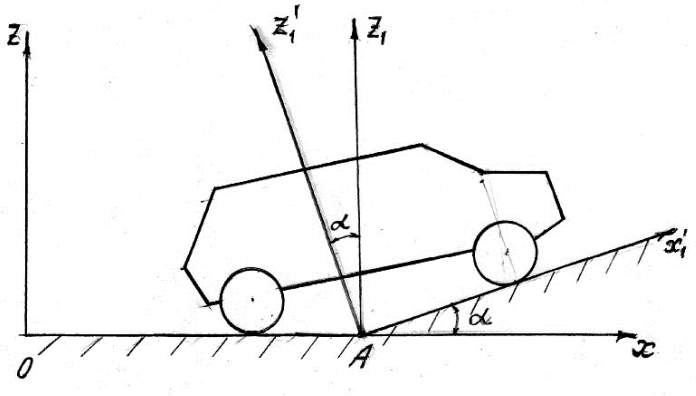


Рис. 14. Расчетная схема движения автомобиля

Сила сопротивления движения на подъем $F_c = G_a \cos\alpha$, где α – угол подъема.

В случае, изображенном на рис. 14, когда автомобиль двигался по горизонтальному, а затем переходит на наклонный участок можно приближенно задать силу F_c в виде некоторой функции.

Представим суммарный момент сопротивления на колесах следующим образом.

$$M_{\Sigma K} = M_{01} + \Delta M_{12} \sin 2\pi f' t \qquad (6)$$

$$M_{\Sigma K} = M_{01} + \Delta M_{12} \quad \text{при } t \geq t_0 \qquad (7)$$

$M_{012} = G_a f_0 r$;

M_{01} – суммарный момент сопротивления качению;

ΔM_{12} – дополнительный момент для случая движения автомобиля на подъем.

$\Delta M_{12} = G_a \sin\alpha \cdot r$, причем t_0 – время от начала въезда переднего колеса до въезда на подъем заданного колеса.

Задаваемая частота $f' = \frac{1}{4t_0}$. (8)

В дальнейшем при моделировании процессов решение проводилось в два этапа.

На первом этапе вначале определяются величины напряжения U_{01} и U_{02} для стационарных режимов при движении автомобиля с выбранной скоростью по горизонтальной плоскости или на подъем с заданной величиной угла подъема α.

Затем система уравнений решается для случая, когда автомобиль, двигаясь по горизонтальному участку, далее продолжает движение на подъем.

При этом момент сопротивления изменяется в соответствии с уравнениями (6) и (7), а закон изменения напряжения записывается в следующем виде.

$U(t) = U_{01} + \Delta U_{12} \sin 2\pi f' t$ при $t < t_0$ и (9)

$U(t) = U_{02}$ при $t > t_0$ (10)

На третьем этапе при изменении напряжения U(t) накладывается составляющая более высокой частоты

$U(t) = U_{01} + \Delta U_{12} \sin 2\pi f' t + \beta \sin 2\pi f' t \sin 2\pi f t$ при $t < t_0$ (11)

$U(t) = U_{02} + \beta \Delta U_{12} \sin 2\pi f t$ при $t \geq t_0$ (12)

f принимает дискретные значения (5, 10, 15, 20, 25, 30) Герц;

β – коэффициент, принимающий значения от 0 до 1(0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0).

Блок-схема математической модели представлена рис. 15, а результаты расчетов на рис. 16-19. В дальнейшем полученные законы управления используются при экспериментальных исследованиях поведения физической модели автомобиля.

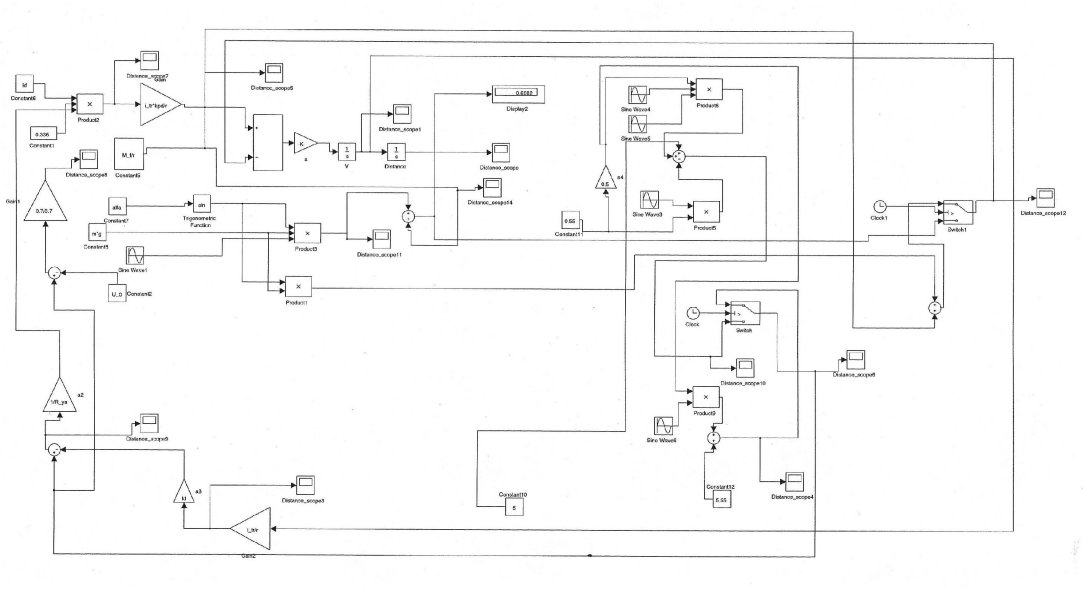


Рис. 15. Схема математической модели в Matlab Simulink

По завершению исследования модели были получены следующие результаты расчетов, представленные графически при заданном угле подъема α=8° (рис. 16-19).

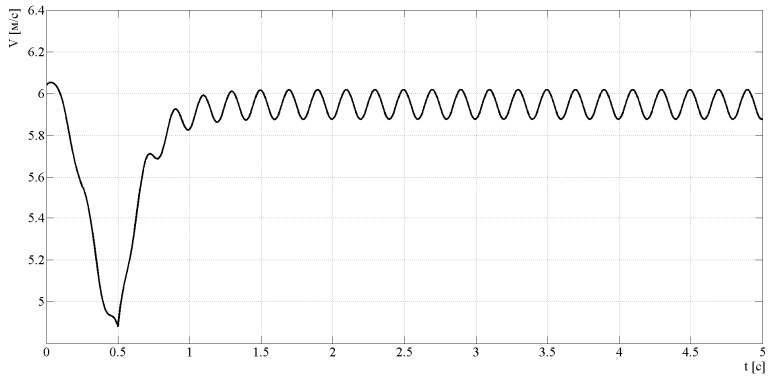


Рис. 16. Изменение скорости автомобиля V при въезде на подъём при импульсном управлении напряжением (β=1; f=5 Гц)

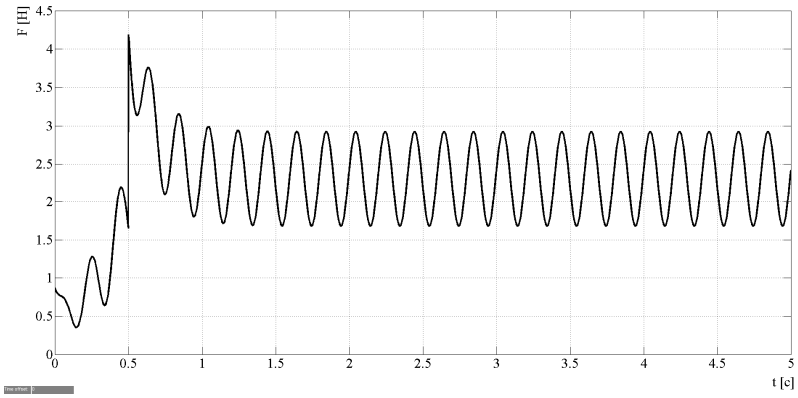


Рис. 17. Изменение суммарной подводимой тяговой силы F при въезде автомобиля на подъём при импульсном управлении напряжением (β=1; f=5 Гц)

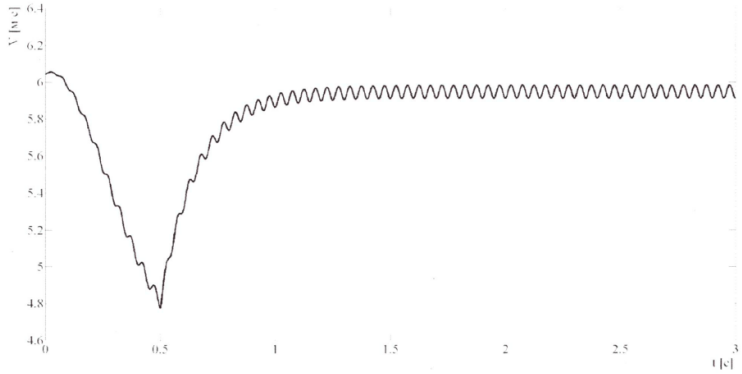


Рис. 18. Изменение скорости автомобиля V при въезде на подъём при импульсном управлении напряжением (β=1; f=20 Гц)

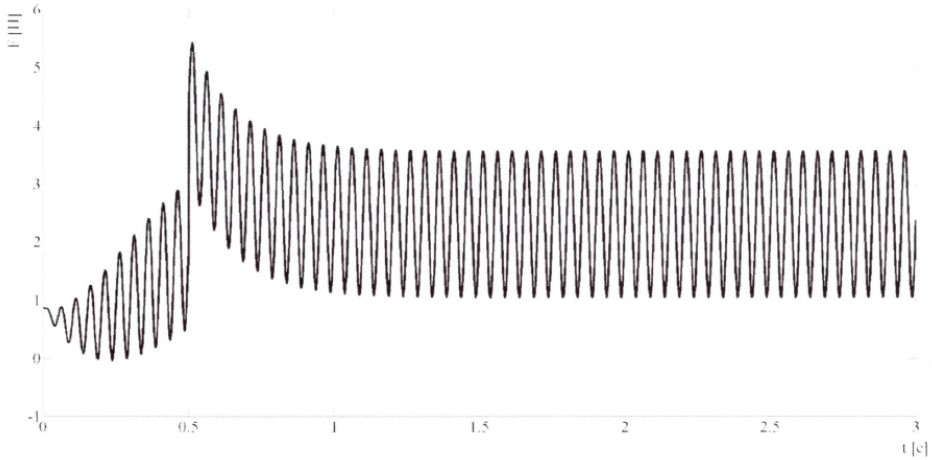


Рис. 19. Изменение суммарной подводимой тяговой силы F при въезде автомобиля на подъём при импульсном управлении напряжением (β=1; f=20 Гц)

Были проведены тестовые испытания модели в различных режимах. В стационарном движении физическая модель преодолевает углы подъема $\alpha=3\ldots6^{\circ}$ (для «жестких» колес) и $\alpha=12\ldots18^{\circ}$ (для «мягких» колес) в зависимости от температуры окружающей среды (рис. 20-21).

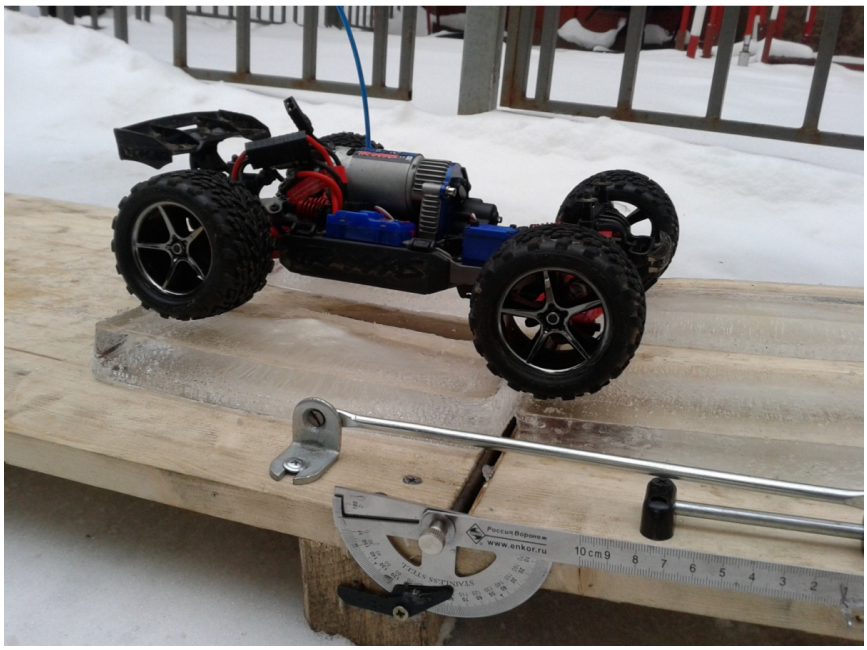


Рис. 20. Исследование взаимодействия модели колесной машины и льда на стенде Горка-2 (с «мягкими» колесами)

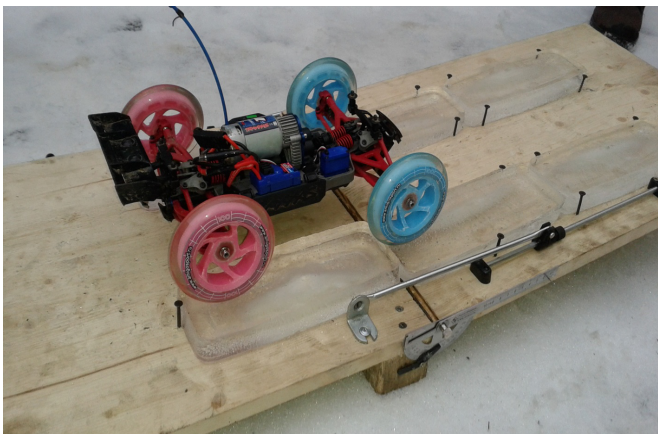
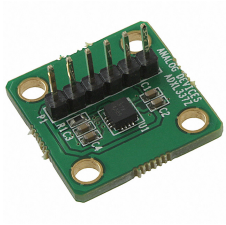


Рис. 21. Исследование модели (с «жесткими» колесами)

Для регистрации ускорения, скорости и пройденного пути модели был создан комплекс, устанавливаемый на автомобиль рис. 22.

1

2



3

Рис. 22. Измерительный комплекс: 1 - модель колесной машины;
2 - устройство сбора данных *USB* 6009; 3 - плата *KIT3109MMAx2x0Q*

Аппаратно-программный комплекс состоит из оборудования «*USB* 6009» фирмы *National Instruments*, датчика акселерометр *MMA*7260 и программного комплекса, выполненного в среде *LabVIEW*.

Инерциальный датчик *MMA*7260 имеет рабочий диапазон, g в пределах ±1,5; 2,0; 4,0; 6,0 и задаются пользователем, чувствительность мВ/g лежит в пределах 800; 600; 300; 200 и зависит от диапазона. Полоса частот, регистрируемых данных по осям XY -350 Гц, Z – 150 Гц.

Сигналы, сформированные в *KIT3109MMAx2x0Q* подаются на аналоговые входы устройства *USB* 6009. Программное обеспечение *NI LabVIEW* позволяет обработать их и визуализировать в режиме реального времени, выдавать графики ускорений, скоростей и пути на экране компьютера. Предусмотрена возможность создавать отчеты, как в формате текстовых файлов, так и в формате *HTML*. Внешний вид лицевой панели прибора показан на рис. 23.

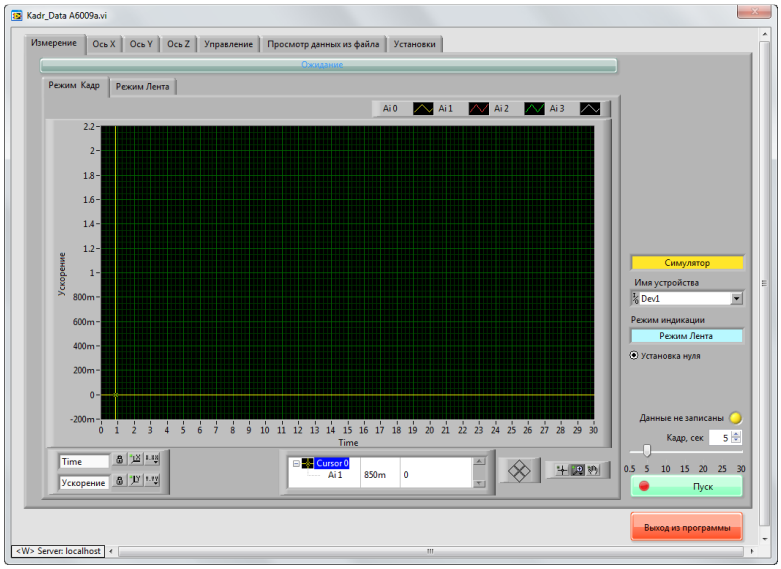


Рис. 23. Внешний вид лицевой панели прибора

Разработанный аппаратно-программный комплекс был протестирован при пробном проведении эксперимента, в ходе которого авторы столкнулись с рядом проблем. В частности, одной из проблем оказалась сложность конструкции модели *E-revo*. Из-за большого количества зубчатых пар, велика вероятность потери того самого импульса, исходящего от двигателя и приходящего на колеса. Также сложность электрической системы заставили нас подумать о параллельном проекте. Параллельно был разработан аппаратно-программный комплекс для второй модели.

Данная масштабная модель имеет меньшие размеры, чем *E-revo*, имеет простую конструкцию трансмиссии, а также более простую электрическую схему на рис. 24 представлен внешний вид модели.

Рис. 24. Масштабная модель *BMW X6*

Для удобства использования данного аналога потребовалась его модернизация, позволяющая производить управление по сигналам, передаваемым с компьютера по *Bluetooth*, а также потребовалось установить устройство регистрации происходящих процессов – инерционный датчик.

Выполнив проект принципиальной схемы расположения компонентов, был произведен монтаж – создан первый прототип печатной платы. Данная печатная плата была установлена на модель рис. 25.

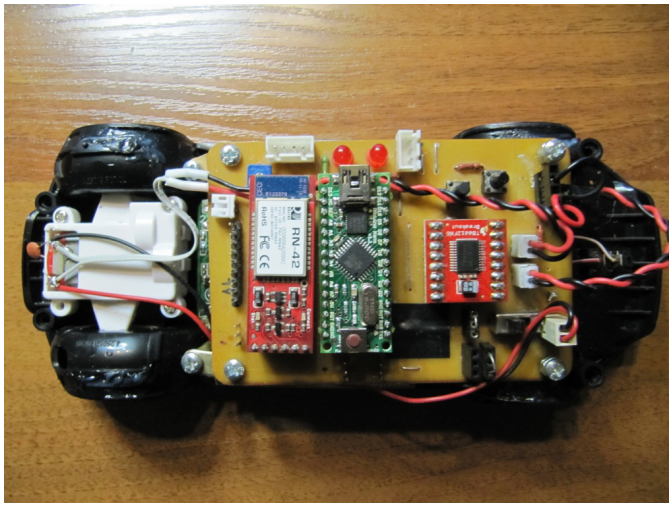


Рис. 25. Модель с печатной платой

После сборки модели и печатной платы потребовалось разработать программный комплекс для работы с экспериментальной моделью.

Программное обеспечение было написано на языке Си в среде разработки *Arduino* 1.0.6., которое выполняет следующие функции:

- получает информацию от стационарного ПК о том, какой режим работы выбран пользователем;

- если выбран режим обработки показаний с инерциального датчика то информация каждые 80 мкс отправляется на стационарный ПК до тех пор, пока не поступит сигнал о завершении сеанса приема-передачи данных;

- если выбран режим дистанционного управления, то платформа ожидает команды от ПК и в зависимости от типа сигнала выполняет соответствующую операцию.

Программное обеспечение для стационарного ПК написано на языке *Delphi* в среде разработки *Delphi XE*2. Вид главного окна показан на рис. 26. Вид окна дистанционного управления показан на рис. 27. Вид окна построения графиков показан на рис. 28.

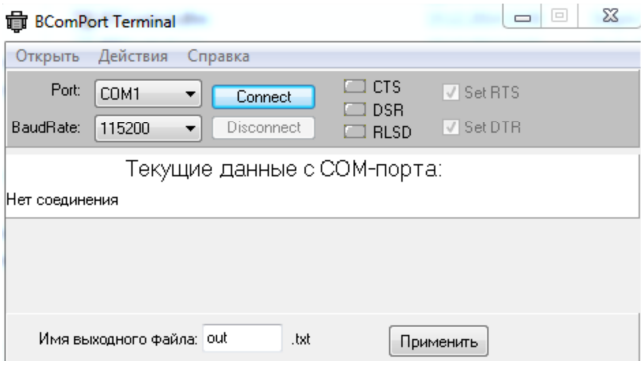


Рис. 26. Вид главного окна

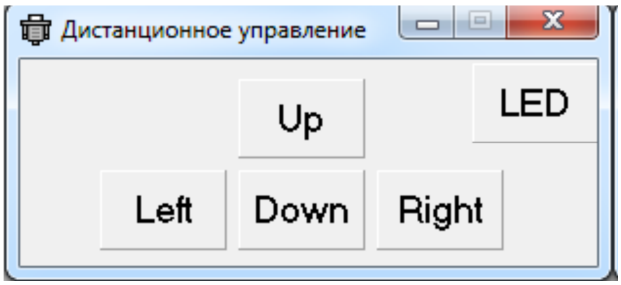


Рис. 27. Вид окна дистанционного управления

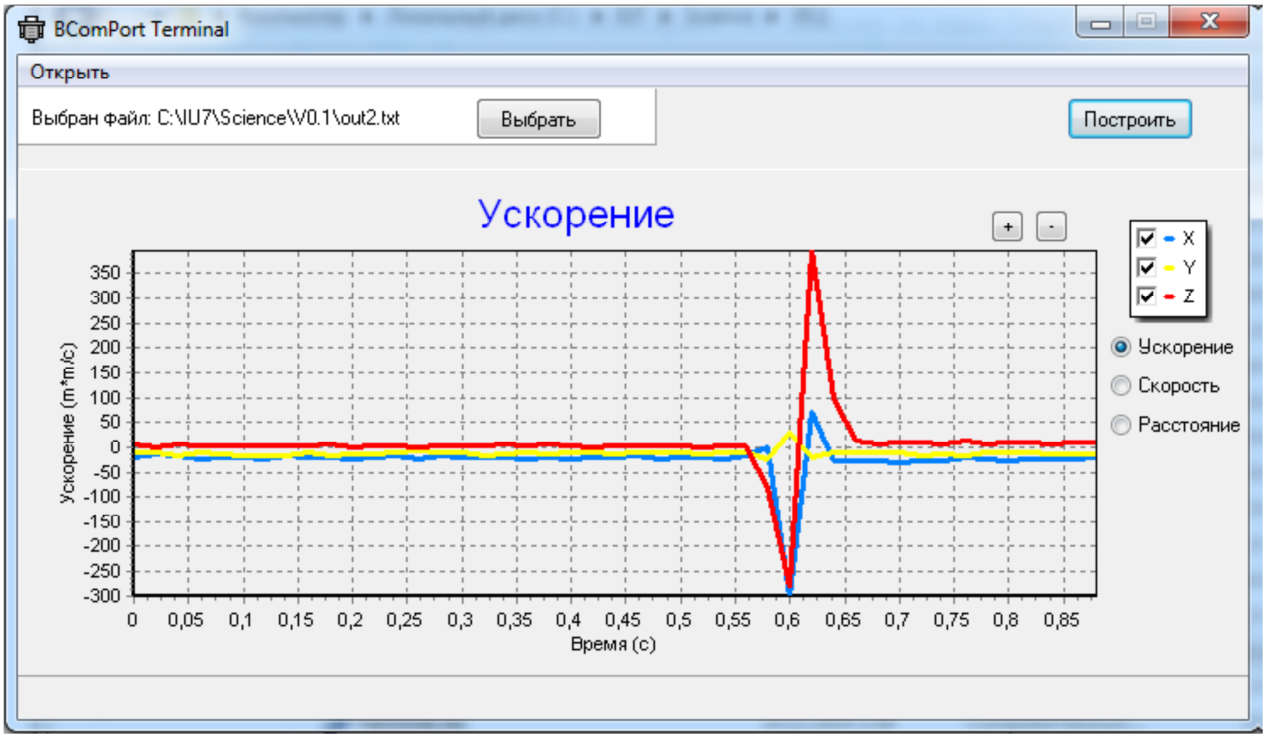


Рис. 28. Вид окна построения графиков

Разработанный аппаратно-программный комплекс проходит стадию доработки – отладка управления электродвигателем модели с целью реализации закона подведения крутящего момента на колеса.

В нашем случае это будет гибкая система, позволяющая менять частоту нагружения, а также другие параметры, рассмотренные ранее. В перспективе надеемся, что данная система должна стать адаптивной.

Результаты и выводы

1. Экспериментальные исследования пары трения: эластомер-лед в стационарных режимах показали, что коэффициент трения μ уменьшается при увеличении номинального давления p_a и скорости скольжения в контакте $V_{ск}$.

2. Результаты проведенных исследований нестационарных режимов при различной интенсивности возрастания тангенциальной силы в контакте и качественно, и количественно совпадают с результатами, полученными другими авторами при экспериментальных исследованиях, выполненных на автомобиле.

3. Проведенные исследования на установке УТУ-3 позволили обобщить ранее известные результаты для широкого диапазона скорости приложения тангенциальной нагрузки.

4. Испытания на установке УТУ-3 на льду подтвердили влияние времени пребывания точки в контакте под действием нормального давления до начала приложения тангенциальной нагрузки на величину реализуемого коэффициента трения (эффект «примерзания»).

5. Определен закон приложения момента, позволяющий реализовать больший коэффициент трения (сцепления) на льду.

6. Проведены пробные испытания модели в исходном виде на ледяной опорной поверхности.

7. Определены основные направления изменения конструкции модели для установления выбранного закона приложения момента.

8. В экспериментах на физической модели при плавном приложении крутящего момента и стационарных режимах установлено, что в зависимости от радиальной жесткости шины и величины номинального давления максимальная величина преодолеваемого угла подъема возрастает от 3…6° до 12…18° при переходе от «жестких» к «мягким» колесам.

9. Проведено тестирование масштабных моделей в стационарных и нестационарных режимах.

10. Проведено тестирование измерительного комплекса в различных режимах.

Список литературы

[1] Persson B.N.J. Theory rubber friction and contact mechanics // MULTISCALECONSULING: Julich, 2001. Available at: http://www.multiscaleconsulting.com/resources/Theory+of+rubber+friction+and+contact+mecanics.pdf, accessed 01.10.2014.

[2] Морозов М.В., Купреянов А.А. Влияние тепловых процессов на трибологические характеристики контакта шины с дорожной поверхностью и вид диаграммы φ(S) для различных режимов работы колеса // Известия вузов. Машиностроение. 2012. № 7. С. 42-51.

[3] Белкин А.Е., Нарская Н.Л. Конечно-элементный анализ контакта автомобильной шины на основе оболочечной модели // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2004. № 3. С.14-28.

[4] Tanner T.A. Computation methods for frictional contact with applications to the space shuttle orbiter nose-gear tire. Development of frictional contact algorithm. Hampton: NASA Publishing, 1996. 45 p.

[5] Морозов М.В. Методы улучшения тягово-сцепных и тормозных свойств автомоибльного колеса с учетом трибологических свойств контакта шины с дорогой: дис. … канд. техн. наук. М., 2012.217 с.

[6] Vladimir I. Experimental Identification of Dynamic Tire Friction Potential on Ice Surfaces. 2001. Available at: http://www.fsb.hr/NewsUpload/31_10_2005_4172_awarded_paper_IAVSD_1stpage.pdf, accessed 01.02.2015.

[7] Иванов Б.Е. Дифференциал подробно. Режим доступа: http://www.wiki.zr.ru/Дифференциал_подробно_2, (дата обращения 25.02.2014).

[8] Кристальный С.Р., Задворнов В.Н., Попов Н.В., Фомичев В.А., Шляхтин А.А. Шинный тестер для исследования характеристик шипованных шин // Вестник МАДИ. Вып. 3(34). 2013. С. 145-197.