

На правах рукописи



Хряков Кирилл Станиславович

**Повышение устойчивости скоростных безрельсовых
транспортных средств при прохождении кривых малого
радиуса**

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» МГУПС (МИИТ) на кафедре «Путевые, строительные машины и робототехнические комплексы».

Научный руководитель **Сорокин Павел Алексеевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Балакина Екатерина Викторовна**
доктор технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», профессор кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей»

Баулина Елена Евгеньевна
кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», доцент кафедры «Наземные транспортные средства»

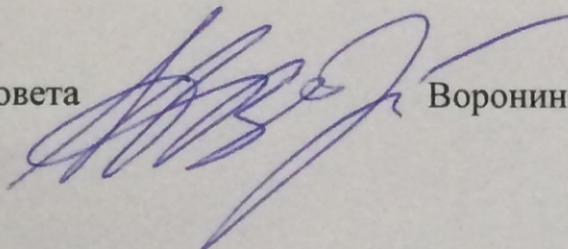
Ведущая организация федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Защита состоится «08» февраля 2017 г., в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МГУПС (МИИТ), www.miit.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При эксплуатации скоростных безрельсовых транспортных средств, одним из основных критериев безопасности является курсовая устойчивость при прохождении кривых малого радиуса.

Существующие методы и технические решения обеспечивают устойчивость скоростного транспортного средства в кривых, при движении со скоростями, не превышающими 150 – 200 км/ч, в зависимости от радиуса кривой. Дальнейшее увеличение скорости прохождения кривых требует повышения курсовой устойчивости скоростного транспортного средства.

Поэтому повышение устойчивости в кривых малого радиуса и улучшение управляемости автомобилей и других скоростных безрельсовых транспортных средств является актуальным.

Объектами исследования являются гоночные автомобили и другие скоростные наземные безрельсовые транспортные средства, использующие для езды асфальтобетонные дороги и оснащенные аэродинамическими элементами, генерирующими прижимную силу.

Степень разработанности темы исследования. Решением проблем обеспечения устойчивости скоростных транспортных средств занимались и занимаются многие отечественные и зарубежные ученые: Д.А. Антонов, Е.В. Балакина, М.М. Жилейкин, А.С. Литвинов, Я.М. Певзнер, В.И. Рязанцев, Ю.Н. Санкин, Е.Б. Сарач, Г.А. Смирнов, Е.А. Чудаков, Д.Р. Эллис, T.D. Gillespie, D. Karnopp, W.F. Milliken, H.V. Pacejka и др.

Анализируя основные направления работ по увеличению устойчивости, можно сделать вывод, что на сегодняшний день наибольшее внимание уделяется предпроектному выбору упругодемпфирующих параметров шасси, улучшению эффективности торможения, перераспределению крутящего момента между колесами и осуществлению активного подруливания.

Зарубежными учеными проведены исследования влияния прижимной силы, генерируемой недеформируемыми аэродинамическими элементами, на устойчивость скоростных транспортных средств.

Однако в этих работах не рассматривается влияние вибраций аэродинамических элементов, возникающих в реальных условиях эксплуатации, на показатели устойчивости при прохождении кривых малого радиуса.

Цель работы заключается в повышении курсовой устойчивости и улучшении управляемости скоростных безрельсовых транспортных средств при прохождении кривых малого радиуса, за счет активного управления их аэродинамическими элементами.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- анализ исследованности факторов, влияющих на устойчивость и управляемость скоростных транспортных средств;

- анализ влияния прижимной аэродинамической силы на устойчивость скоростного транспортного средства в кривой малого радиуса;
- экспериментальные исследования вибраций аэродинамических элементов скоростных транспортных средств;
- разработка математической модели движения скоростного транспортного средства, учитывающей вибрации аэродинамических элементов, и проверка ее адекватности путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными;
- исследование резонансных явлений в конструкции аэродинамических элементов скоростных транспортных средств;
- анализ влияния вибраций аэродинамических элементов на уровень генерируемой ими прижимной силы;
- разработка способа и системы обеспечения устойчивости скоростных безрельсовых транспортных средств, оборудованных аэродинамическими элементами, генерирующими прижимную силу.

Научная новизна. Установлена степень влияния вибраций аэродинамических элементов, генерирующих прижимную силу, на устойчивость скоростного транспортного средства при прохождении кривых.

Теоретическая значимость. Положения диссертации служат теоретическим обоснованием работы системы обеспечения устойчивости и улучшения управляемости скоростных безрельсовых транспортных средств при прохождении кривых малого радиуса, путем непрерывного сравнения реального угла поворота руля транспортного средства с теоретическим углом поворота, необходимым и достаточным для прохождения кривой в конкретных условиях.

Практическая значимость. Предложенное техническое решение:

- позволяет увеличить скорость прохождения кривых малого радиуса скоростными транспортными средствами, без потери устойчивости;
- повышает безопасность и комфорт езды на скоростных транспортных средствах.

Методология и методы исследования. Работа выполнена в соответствии с основными положениями теорий устойчивости и управляемости автомобиля, гидро- и газодинамики, и теории автоматического управления. В ходе выполнения работы использованы методы экспериментальных исследований и цифровой обработки сигналов, спектральный анализ колебательных процессов, метод конечных элементов и метод вычислительной гидродинамики. Для расчетов применялись вычислительные комплексы MATLAB – Simulink, ANSYS и электронные вычислительные таблицы Microsoft Excel. Разработка чертежей и трехмерных моделей осуществлялась в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D. Программа работы системы обеспечения устойчивости написана на графическом языке программирования CFC среды разработки CODESYS.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель движения скоростного транспортного средства, учитывающая вибрации аэродинамических элементов;
- результаты исследования влияния вибраций аэродинамических элементов на уровень генерируемой ими прижимной силы;
- способ обеспечения устойчивости скоростных безрельсовых транспортных средств в кривых малого радиуса, за счет активного управления закрылками антикрыльев.

Степень достоверности положений и выводов подтверждается базированием проведенных исследований на основных физических законах и общепринятых принципах, соответствием разработанных моделей натурным аналогам и проведением экспериментальных исследований.

Апробация результатов. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на семинарах кафедры «Путевые, строительные машины и робототехнические комплексы» Московского государственного университета путей сообщения, на 13-й научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» МИИТ, 2012 г., на X Международной научно-практической конференции «Trans-Mech-Art-Chem» МИИТ, 2014 г., на международной научно-практической конференции «Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы, как катализатор роста экономики государства» Красноярск, Сибирский федеральный университет, 2016 г.

Работа «Метод и технические средства управления динамической устойчивостью стационарных башенных кранов», выполненная коллективом авторов в составе: А.В. Мишин, К.С. Хряков, Чан Дык Хиеу, отмечена золотой медалью 12-й Всероссийской выставки научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2012», проходящей на ВВЦ 26 – 29 июня 2012 года.

Работа «Способ обеспечения устойчивости башенных кранов от опрокидывания», выполненная коллективом авторов в составе: К.С. Хряков, А.В. Мишин, отмечена грантом второй степени 13-й Всероссийской выставки научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2013», проходящей на ВВЦ 25 – 28 июня 2013 года.

Работа «Средство обеспечения устойчивости грузоподъемных машин при ненормируемых внешних воздействиях», выполненная К.С. Хряковым, отмечена грантом УМНИК 23 ноября 2012 года.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них 5 статей в изданиях, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Минобразования Российской Федерации и 4 тезиса научных докладов.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 196 страницах машинописного текста, содержит 101 рисунок, 10 таблиц, 2 приложения и список литературы из 128 наименований. Работа состоит из введения, четырех разделов с выводами, заключения и списка литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, описана ее структура, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимости.

В первой главе рассмотрена классификация основных типов скоростных безрельсовых транспортных средств, приведены оценочные показатели их устойчивости, определены основные факторы, влияющие на траекторную устойчивость скоростного транспортного средства в кривой, проведен анализ исследованности влияния каждого фактора на устойчивость скоростного транспортного средства при прохождении кривых малого радиуса.

На основе проведенного анализа, можно выделить основные факторы, влияющие на устойчивость скоростного транспортного средства при прохождении кривых. К ним относятся: перераспределение веса транспортного средства между его колесами во время езды, жесткостные и демпфирующие характеристики элементов подвески, характеристики шин, характеристики тормозной системы, распределение тягового усилия между колесами, углы поворота и установки колес, аэродинамические характеристики транспортного средства, мастерство водителя, внешние факторы (погода, состояние дорожного полотна, конфигурация трассы и др.).

Решением проблем обеспечения устойчивости скоростных транспортных средств занимались и занимаются многие отечественные и зарубежные ученые: Д.А. Антонов, Е.В. Балакина, Е.Е. Баулина, С.В. Бахмутов, М.М. Жилейкин, А.М. Иванов, В.Н. Кравец, С.Р. Кристальный, В.В. Ларин, А.С. Литвинов, Я.М. Певзнер, В.И. Рязанцев, В.И. Сальников, Ю.Н. Санкин, Е.Б. Сарач, В.В. Селифонов, Г.А. Смирнов, А.И. Федотов, Е.А. Чудаков, Д.Р. Эллис, T.D. Gillespie, D. Karnopp, W.F. Milliken, H.B. Pacejka и др. Многие из этих ученых посвятили свои работы исследованию влияния на устойчивость безрельсовых транспортных средств, одного или нескольких факторов, рассмотренных выше.

Анализируя основные направления работ по увеличению устойчивости, можно сделать вывод, что на сегодняшний день наибольшее внимание уделяется предпроектному выбору упругодемпфирующих параметров шасси, улучшению эффективности торможения, перераспределению крутящего момента между колесами и осуществлению активного подруливания. При этом влияние на устойчивость аэродинамических характеристик кузова скоростных транспортных средств остается недостаточно изученными.

Широкое распространение в автоспорте получили аэродинамические элементы, работающие по принципу перевернутого авиационного крыла (антикрылья), и генерирующие прижимную силу, увеличивающую устойчивость скоростного транспортного средства при прохождении кривых.

На современных автомобилях, типа формула-1, суммарное значение прижимной силы распределено между генерирующими ее аэродинамическими элементами следующим образом: 30 % переднее

антикрыло, 45 % днище автомобиля, 5 % обводы корпуса автомобиля, 20 % заднее антикрыло.

Зависимость критической скорости $[v_{кр}]$ по условию скольжения, от аэродинамических характеристик скоростного транспортного средства, может быть описана формулой (1):

$$[v_{кр}] = \sqrt{\frac{\mu t g}{\sqrt{\left(\frac{m}{R}\right)^2 + \frac{\rho^2 (S_k c_{лс.к} + S_{ант} c_{лс.ант})^2}{4}} - \frac{\rho S_{ант} c_{пр.ант}}{2}}}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения скольжения колес с дорогой; m – масса скоростного транспортного средства; g – ускорение свободного падения; R – радиус кривой; ρ – плотность воздуха; S_k – характерная площадь корпуса транспортного средства; $c_{лс.к}$ – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления корпуса транспортного средства; $S_{ант}$ – характерная площадь антикрыльев транспортного средства; $c_{лс.ант}$ – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления антикрыльев транспортного средства; $c_{пр.ант}$ – аэродинамический коэффициент прижимной силы антикрыльев транспортного средства.

Движение скоростного транспортного средства в кривой будет устойчивым по условию скольжения, если скорость его движения $v_{авт}$ не будет превышать критическую:

$$v_{авт} \leq [v_{кр}]. \quad (2)$$

Из формулы (1) видно, что при увеличении значения членов, определяющих прижимную силу ($c_{пр.ант}$ и $S_{ант}$), значение критической скорости при прохождении кривых $[v_{кр}]$ увеличивается.

Зарубежными учеными проведены исследования влияния прижимной силы, генерируемой недеформируемыми антикрыльями, на устойчивость скоростных транспортных средств. В силу конструктивных особенностей антикрыльев, в реальных условиях эксплуатации, из-за неровностей дорожного полотна, вибраций двигателя и трансмиссии, в антикрыльях могут возникать колебания, снижающие эффективность их использования.

В связи с этим, необходимо изучить влияние вибраций антикрыльев, на уровень генерируемой ими прижимной силы.

Во второй главе проведены экспериментальные исследования вибраций переднего антикрыла гоночного автомобиля Даллара T12, разработана математическая модель движения скоростного безрельсового транспортного средства для анализа вибраций его аэродинамических элементов, генерирующих прижимную силу, на примере гоночного автомобиля Даллара T12, проведена оценка адекватности разработанной математической модели путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными.

В ходе проведения эксперимента, для анализа изгибных и крутильных колебаний антикрыла, с частотой 100 Гц, измерялись вертикальные

перемещения и закручивания торцевой пластины антикрыла. Для проведения замеров были использованы: лазерный датчик измерения дорожного просвета K-RHL2 фирмы «КА Сэнсорс» (Великобритания), и датчик измерения угловой скорости GYRP-1 axis фирмы «Тэксэнсэ» (Франция).

В ходе эксперимента было проведено 8 заездов автомобиля по гоночной трассе Моторлэнд Арагон (Испания). Конфигурация трассы, длиной 5345 м, содержит 18 кривых различного радиуса (15 – 180 м). Максимальный перепад высот составляет 50 м. Проведение большего числа заездов с замерами затруднительно из-за высокой стоимости проведения испытаний.

При анализе результатов эксперимента, было выделено три характерных случая, возникающих во время проезда одного круга трассы: 1-й случай – заезд левыми колесами на бордюр, высотой 4 см, в кривой, радиусом 30 м, на скорости 85 км/ч без ускорения в течение 2 с, 2-й случай – заезд на бордюр высотой 2 см, в кривой, радиусом 120 м, с ускорением со 103 до 185 км/ч в течение 3 с, и 3-й случай – движение по ровной дороге с ускорением со 193 до 280 км/ч в течение 10 с.

В диссертации разработана математическая модель движения скоростного транспортного средства, учитывающая вибрации его аэродинамических элементов во время езды по гоночной трассе (рисунок 1).

Модель состоит из пяти твердых тел, моделирующих подрессоренную и неподдресоренные массы, связанных между собой при помощи подвесок, смоделированных упругими и диссипативными элементами. Вводятся допущения, углы установки колес равны нулю, элементы подвески могут деформироваться только вдоль вертикальной оси, а движение автомобиля происходит по однородной шероховатой поверхности.

Уравнения движения центра масс автомобиля C относительно точки O и уравнения изменения кинематического момента корпуса автомобиля относительно точки C , имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} &= \sum_{i=1}^4 P_{xi} + m\dot{y}\dot{\psi} + F_{ax} + F_x^*; \\
 m\ddot{y} &= \sum_{i=1}^4 P_{yi} - m\dot{x}\dot{\psi} + F_{ay} + F_y^*; \\
 m\ddot{z} &= \sum_{i=1}^4 N_i^n - mg - F_{az} + F_z^*; \\
 I_x\ddot{\theta} &= N_1^n b_1 - N_2^n b_2 + N_3^n b_1 - N_4^n b_2 + (h + \Delta Z) \sum_{i=1}^4 P_{yi} + M_{ax} + M_x^*; \\
 I_y\ddot{\phi} &= N_3^n l_2 + N_4^n l_2 - N_1^n l_1 - N_2^n l_1 - (h + \Delta Z) \sum_{i=1}^4 P_{xi} + M_{ay} + M_y^*; \\
 I_z\ddot{\psi} &= (P_{x2} + P_{x4})b_2 - (P_{x1} + P_{x3})b_1 + \\
 &+ (P_{y1} + P_{y2})l_1 - (P_{y3} + P_{y4})l_2 + M_{az} + M_z^*,
 \end{aligned} \tag{3}$$

где m – полная масса автомобиля; P_{xi}, P_{yi} – проекции составляющих контактных сил на оси системы Cxy ; N_i^n – проекции на оси системы $Cxyz$ сил, действующих на подрессоренную массу автомобиля со стороны подвески; F_{ax}, F_{ay}, F_{az} – проекции на оси системы $Cxyz$ результирующей аэродинамической силы; F_x^*, F_y^*, F_z^* – проекции на оси системы $Cxyz$ сторонних сил, действующих на кузов автомобиля; g – ускорение свободного

падения; I_x, I_y, I_z – главные центральные моменты инерции подрессоренной массы автомобиля относительно осей системы $Cxyz$; ψ, θ, φ – углы рысканья, крена и тангажа; l_1, l_2 – расстояния между центром масс кузова автомобиля и передней и задней осями; b_1, b_2 – расстояния между центром масс кузова и левыми и правыми неподдресоренными массами; ΔZ – перемещение по вертикали точки C относительно состояния статического равновесия $Z = h$; M_{ax}, M_{ay}, M_{az} – проекции на оси системы $Cxyz$ результирующего аэродинамического момента; M_x^*, M_y^*, M_z^* – проекции на оси системы $Cxyz$ сторонних моментов, действующих на кузов автомобиля.

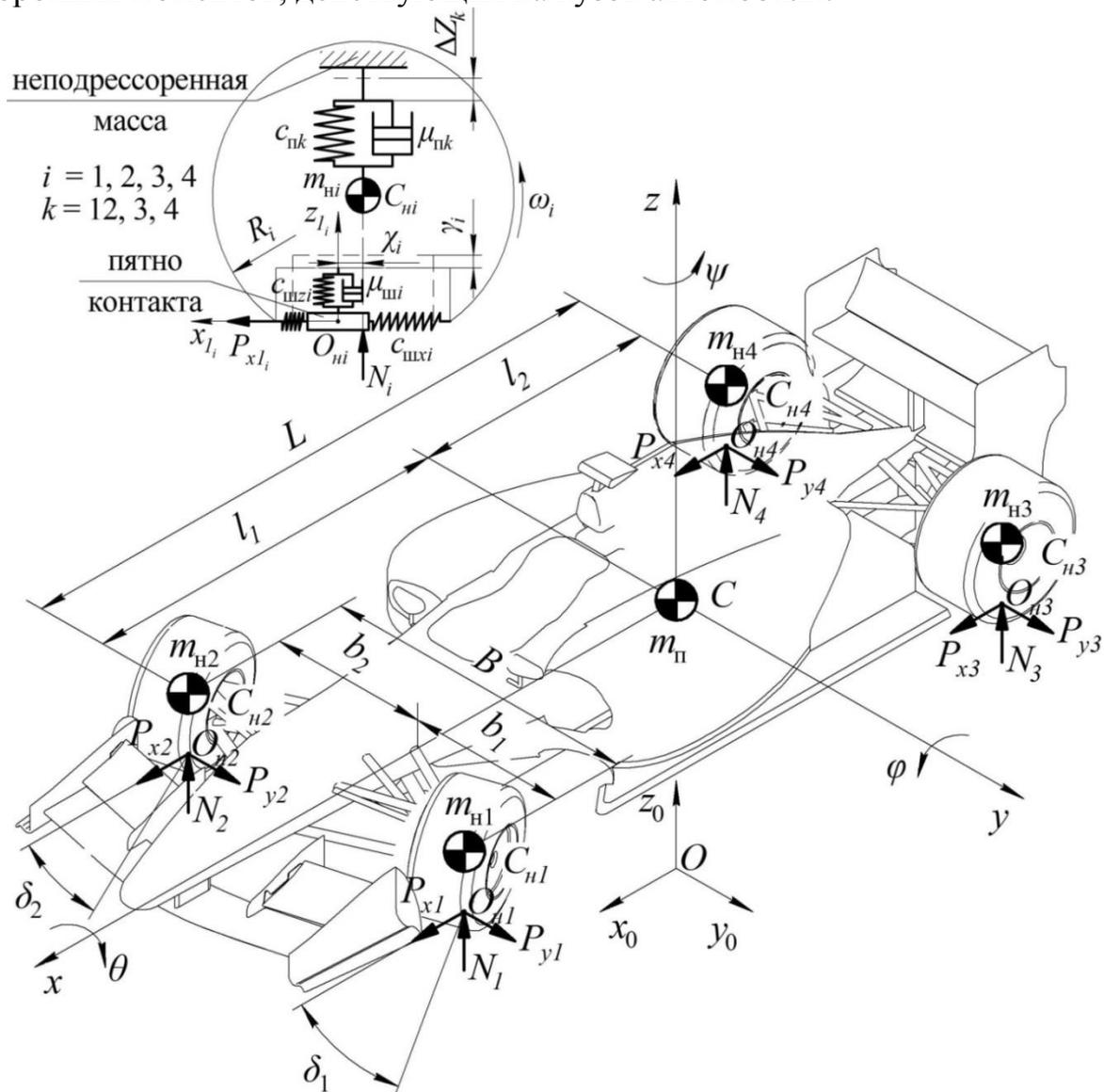


Рисунок 1 – Математическая модель скоростного транспортного средства

Уравнения движения неподдресоренных масс, записанных в проекциях на оси $O_{ni}z_{li}$, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 m_{H1}\ddot{y}_1 &= N_1^{\Pi} - N_1 + m_{H1}g + F_{az1} - F_{z1}^*; \\
 m_{H2}\ddot{y}_2 &= N_2^{\Pi} - N_2 + m_{H2}g + F_{az2} - F_{z2}^*; \\
 m_{H3}\ddot{y}_3 &= N_3^{\Pi} - N_3 + m_{H3}g + F_{az3} - F_{z3}^*; \\
 m_{H4}\ddot{y}_4 &= N_4^{\Pi} - N_4 + m_{H4}g + F_{az4} - F_{z4}^*,
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где m_{ni} – i -я неподрессоренная масса; γ_i – радиальная деформация i -го колеса; N_i – проекции нормальных реакций со стороны дорожного полотна на оси $O_{ni}z_{1i}$; F_{azi} – проекции на оси $O_{ni}z_{1i}$ результирующих аэродинамических сил, действующих на неподрессоренные массы; F_{zi}^* – проекции на оси $O_{ni}z_{1i}$ сторонних сил, действующих на неподрессоренные массы.

Кинематические соотношения между скоростями деформации подвесок и скоростями вертикальных перемещений кузова автомобиля представлены в виде уравнений (5):

$$\begin{aligned}\Delta\dot{Z}_{12} &= -l_1\dot{\varphi}\cos\varphi + \Delta\dot{Z}; \\ \Delta\dot{Z}_3 &= l_2\dot{\varphi}\cos\varphi + b_1\dot{\theta}\cos\theta + \Delta\dot{Z}; \\ \Delta\dot{Z}_4 &= l_2\dot{\varphi}\cos\varphi - b_2\dot{\theta}\cos\theta + \Delta\dot{Z},\end{aligned}\quad (5)$$

где ΔZ_k – вертикальные деформации подвески относительно состояния статического равновесия ($k = 1, 2, 3, 4$).

Уравнения изменения кинематического момента колес автомобиля относительно осей их вращения $C_{ni}y_i$ и механизма рулевого управления относительно осей поворота передних колес $C_{ni}z_i$ имеют вид:

$$\begin{aligned}I_1\dot{\omega}_1 &= -P_{x1_1}(R_{п1} - \gamma_1) + M_{трм1}; \\ I_2\dot{\omega}_2 &= -P_{x1_2}(R_{п2} - \gamma_2) + M_{трм2}; \\ I_3\dot{\omega}_3 &= -P_{x1_3}(R_3 - \gamma_3) + M_{трм3}; \\ I_4\dot{\omega}_4 &= -P_{x1_4}(R_3 - \gamma_4) + M_{трм4}; \\ I_{z1_1}\ddot{\delta}_1 &= M_{рул1} - I_{z1_1}\ddot{\psi}; \\ I_{z1_2}\ddot{\delta}_2 &= M_{рул2} - I_{z1_2}\ddot{\psi},\end{aligned}\quad (6)$$

где I_i – момент инерции i -го колеса относительно оси его вращения; I_{z1_1}, I_{z1_2} – моменты инерции переднего левого и переднего правого колес вместе с элементами механизма рулевого управления относительно осей их поворота; ω_i – абсолютная угловая скорость вращения i -го колеса; P_{x1_i} – проекции составляющих контактных сил на оси $O_{ni}x_{1i}$; $R_{п1}, R_3$ – радиус передних и задних колес; $M_{трми}$ – тормозной или разгонный момент i -го колеса; δ_1, δ_2 – углы поворота колес; $M_{рул1}, M_{рул2}$ – рулевые моменты переднего левого и переднего правого колес, действующие вокруг осей их поворота.

Изменение усилий, возникающих в элементах подвески автомобиля, описано уравнениями (7):

$$\begin{aligned}N_1^п &= N_2^п = -c_{п12}\Delta Z_{12} - \mu_{п12}\Delta\dot{Z}_{12}; \\ N_3^п &= -c_{п3}\Delta Z_3 - \mu_{п3}\Delta\dot{Z}_3; \\ N_4^п &= -c_{п4}\Delta Z_4 - \mu_{п4}\Delta\dot{Z}_4,\end{aligned}\quad (7)$$

где $c_{п12}, c_{п3}, c_{п4}$ – жесткости подвесок; $\mu_{п12}, \mu_{п3}, \mu_{п4}$ – коэффициенты демпфирования подвесок.

Изменение нормальных реакций дороги в зависимости от деформации шин, описано уравнениями (8):

$$\begin{aligned} N_1 &= c_{шz1}\gamma_1 + \mu_{ш1}\dot{\gamma}_1; \\ N_2 &= c_{шz2}\gamma_2 + \mu_{ш2}\dot{\gamma}_2; \\ N_3 &= c_{шz3}\gamma_3 + \mu_{ш3}\dot{\gamma}_3; \\ N_4 &= c_{шz4}\gamma_4 + \mu_{ш4}\dot{\gamma}_4, \end{aligned} \quad (8)$$

где $c_{шzi}$ – жесткости шин; $\mu_{ши}$ – коэффициенты демпфирования шин.

Соотношение между проекциями составляющих контактных сил на оси систем координат $Cxyz$ и $C_{ni}x_iy_iz_i$ описано уравнениями (9) и (10):

$$\begin{aligned} P_{x1} &= P_{x1_1}\cos\delta_1 - P_{y1_1}\sin\delta_1; & P_{x3} &= P_{x1_3}; \\ P_{y1} &= P_{x1_1}\sin\delta_1 + P_{y1_1}\cos\delta_1; & P_{y3} &= P_{y1_3}; \\ P_{x2} &= P_{x1_2}\cos\delta_2 - P_{y1_2}\sin\delta_2; & P_{x4} &= P_{x1_4}; \\ P_{y2} &= P_{x1_2}\sin\delta_2 + P_{y1_2}\cos\delta_2; & P_{y4} &= P_{y1_4}, \end{aligned} \quad (9) \quad (10)$$

где P_{y1_i} – проекции составляющих контактных сил на оси $O_{ni}y_{li}$.

Соотношения между деформациями подвесок и вертикальными перемещениями кузова автомобиля представлены в виде уравнений (11):

$$\begin{aligned} \Delta Z_{12} &= -l_1\sin\varphi + \Delta Z; \\ \Delta Z_3 &= l_2\sin\varphi + b_1\sin\theta + \Delta Z; \\ \Delta Z_4 &= l_2\sin\varphi + b_2\sin\theta + \Delta Z. \end{aligned} \quad (11)$$

Соотношения координат в системах $Ox_0y_0z_0$ и $Cxyz$ описывается уравнениями (12):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{x}_0\cos\psi - \dot{y}_0\sin\psi; \\ \dot{y} &= \dot{x}_0\sin\psi + \dot{y}_0\cos\psi; \\ \dot{z} &= \dot{z}_0. \end{aligned} \quad (12)$$

Проекции на оси системы $Cxyz$ результирующих аэродинамических сил, действующих на подрессоренную и непрессоренные массы и результирующего аэродинамического момента, действующего на кузов автомобиля описываются уравнениями (13) и (14):

$$\begin{aligned} F_{ax} &= c_x S \rho \frac{\dot{x}^2}{2}; & M_{ax} &= m_x S L_a \rho \frac{\dot{x}^2}{2}; \\ F_{ay} &= c_y S \rho \frac{\dot{x}^2}{2}; & M_{ay} &= m_y S L_a \rho \frac{\dot{x}^2}{2}; \\ F_{az} &= c_z S \rho \frac{\dot{x}^2}{2}; & M_{az} &= m_z S L_a \rho \frac{\dot{x}^2}{2}, \\ F_{azi} &= c_{zi} S_i \rho \frac{\dot{x}^2}{2}; \end{aligned} \quad (13) \quad (14)$$

где c_x – аэродинамический коэффициент силы лобового сопротивления для кузова автомобиля; c_y – аэродинамический коэффициент боковой силы для кузова автомобиля; c_z – аэродинамический коэффициент прижимной силы для кузова автомобиля; c_{zi} – аэродинамические коэффициенты прижимной силы для непрессоренных масс; S – характерная площадь кузова автомобиля, на которую воздействует воздушный поток; S_i – характерные площади непрессоренных масс автомобиля, на которые воздействует воздушный поток; ρ – плотность воздуха; m_x – аэродинамический

коэффициент момента крена; m_y – аэродинамический коэффициент момента тангажа; m_z – аэродинамический коэффициент момента рыскания; L_a – характерная длина кузова автомобиля, на которую воздействует аэродинамический поток.

Полная масса автомобиля и геометрическая связь между углами поворота передних колес, описываются выражениями (15) и (16):

$$m = m_{\Pi} + \sum_{i=1}^4 m_{hi}; \quad (15) \quad \operatorname{tg} \delta_2 = \frac{L \operatorname{tg} \delta_1}{L + B \operatorname{tg} \delta_1}. \quad (16)$$

Моменты инерции колес относительно осей их вращения и моменты инерции передних колес, относительно оси их поворота, описываются уравнениями (17):

$$\begin{aligned} I_i &= m_i r_i^2; \\ I_{z1j} &= m_j r_{z1j}^2, \end{aligned} \quad (17)$$

где r_i – радиусы инерции колес автомобиля относительно осей их вращения; r_{z1j} – радиусы инерции передних колес автомобиля и элементов механизма рулевого управления относительно осей их поворота.

Проекции скоростей точек контакта колес с дорожным полотном на оси систем $O_{hi}x_{li}y_{li}z_{li}$, описываются уравнениями (18):

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1_1} &= (\dot{x} - \dot{\psi} b_1) \cos \delta_1 + (\dot{y} + \dot{\psi} l_1) \sin \delta_1 - \omega_1 R_{\Pi}; \\ \dot{y}_{1_1} &= -(\dot{x} - \dot{\psi} b_1) \sin \delta_1 + (\dot{y} + \dot{\psi} l_1) \cos \delta_1; \\ \dot{x}_{1_2} &= (\dot{x} + \dot{\psi} b_2) \cos \delta_2 + (\dot{y} + \dot{\psi} l_1) \sin \delta_2 - \omega_2 R_{\Pi}; \\ \dot{y}_{1_2} &= -(\dot{x} + \dot{\psi} b_2) \sin \delta_2 + (\dot{y} + \dot{\psi} l_1) \cos \delta_2; \\ \dot{x}_{1_3} &= \dot{x} - \dot{\psi} b_1 - \omega_3 R_3; \quad \dot{y}_{1_3} = \dot{y} - \dot{\psi} l_2; \\ \dot{x}_{1_4} &= \dot{x} + \dot{\psi} b_2 - \omega_4 R_3; \quad \dot{y}_{1_4} = \dot{y} - \dot{\psi} l_2. \end{aligned} \quad (18)$$

Выражения для составляющих касательных контактных сил, спроецированных на оси систем $O_{hi}x_{li}y_{li}z_{li}$ и относительные проскальзывания колес описываются уравнениями (19) и (20):

$$\begin{aligned} P_{x1_i} &= -f_{xi} N_i \frac{E_{xi}}{E_i} [p(E_i)]; \\ P_{y1_i} &= -f_{yi} N_i \frac{E_{yi}}{E_i} [p(E_i)]; \end{aligned} \quad (19) \quad \begin{aligned} E_{x1} &= \frac{\dot{x}_{1_1}}{\omega_1 R_{\Pi}}; \quad E_{y1} = \frac{\dot{y}_{1_1}}{\omega_1 R_{\Pi}}; \\ E_{x2} &= \frac{\dot{x}_{1_2}}{\omega_2 R_{\Pi}}; \quad E_{y2} = \frac{\dot{y}_{1_2}}{\omega_2 R_{\Pi}}; \\ E_{x3} &= \frac{\dot{x}_{1_3}}{\omega_3 R_3}; \quad E_{y3} = \frac{\dot{y}_{1_3}}{\omega_3 R_3}; \\ E_{x4} &= \frac{\dot{x}_{1_4}}{\omega_4 R_3}; \quad E_{y4} = \frac{\dot{y}_{1_4}}{\omega_4 R_3}; \end{aligned} \quad (20)$$

$$E_i = \sqrt{E_{xi}^2 + E_{yi}^2}.$$

где f_{xi} , f_{yi} – коэффициенты трения скольжения в продольном и поперечном направлениях, относительно плоскостей симметрии колес; E_{xi} , E_{yi} – относительные проскальзывания колес и опорной плоскости

в продольном и поперечном направлениях; E_i – суммарное относительное проскальзывание колес; $p(E_i)$ – зависимость контактной силы i -го колеса от его относительного проскальзывания.

Перемещения при изгибно-крутильных колебаниях переднего антикрыла описываются уравнениями (21):

$$EI_{\text{па}} \frac{\partial^4 z_{\text{па}}}{\partial y_{\text{па}}^4} - m_{\text{па}} v_{\text{па}}^2 (z_{\text{па}} + \sigma(y_{\text{па}}) \varphi_{\text{па}}) = 0;$$

$$GI_{\varrho.\text{па}} \frac{\partial^2 \varphi_{\text{па}}}{\partial y_{\text{па}}^2} + m_{\text{па}} v_{\text{па}}^2 (\varrho_{\text{па}}^2 \varphi_{\text{па}} - \sigma(y_{\text{па}}) z_{\text{па}}) = 0,$$
(21)

где E, G – модуль Юнга и модуль сдвига для материала антикрыла; $I_{\text{па}}, I_{\varrho.\text{па}}$ – моменты сопротивления сечения переднего антикрыла изгибу и кручению; $z_{\text{па}}, \varphi_{\text{па}}$ – амплитуда прогиба антикрыла и угол его закручивания; $m_{\text{па}}$ – масса единицы антикрыла; $v_{\text{па}}$ – круговая частота колебаний антикрыла; $\sigma(y_{\text{па}})$ – расстояние между центром масс и продольной осью антикрыла; $\varrho_{\text{па}}$ – радиус инерции массы $m_{\text{па}}$ относительно продольной оси антикрыла.

Соотношение между вертикальными перемещениями точки крепления антикрыла и центра масс кузова автомобиля, описано уравнением (22):

$$\Delta z_{\text{па}} = -l_{\text{кпа}} \sin \varphi + \Delta Z,$$
(22)

где $\Delta z_{\text{па}}$ – вертикальные перемещения точки крепления переднего антикрыла; $l_{\text{кпа}}$ – расстояние между центром масс автомобиля и точкой крепления переднего антикрыла в продольном направлении.

Разработанная модель (формулы (3) – (22)) построена в среде MATLAB – Simulink и представляет собой замкнутую систему, позволяющую однозначно определить движение гоночного автомобиля Даллара T12. Для решения этой системы необходимо задать начальные условия, возмущения $F_x^*, F_y^*, F_z^*, M_x^*, M_y^*, M_z^*, F_{zi}^*$ и управления $M_{\text{рул1}}, M_{\text{рул2}}, M_{\text{трmi}}$.

Модель позволяет определять характеристики вибраций аэродинамических элементов скоростных транспортных средств, возникающих при наезде на неровности, характерные современным гоночным автодромам, такие, например, как бордюры пилообразной формы.

Оценка адекватности разработанной математической модели проводилась путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. Для этого модель была посчитана в среде MATLAB – Simulink, с возмущающими воздействиями и начальными условиями, соответствующими каждому из трех, выделенных на основе результатов эксперимента, характерных случаев. Исследование характера колебаний было проведено методом спектрального анализа.

На рисунке 2 изображена спектральная плотность мощности изгибных колебаний антикрыла в 1-м характерном случае. На спектре ярко выражены пики в районе 0,6 и 2 Гц, соответствующие 1-му и 2-му резонансам шасси автомобиля. Наибольшей энергией обладают колебания с частотами, близкими к 4,5 Гц, соответствующие упругим колебаниям основной плоскости переднего антикрыла.

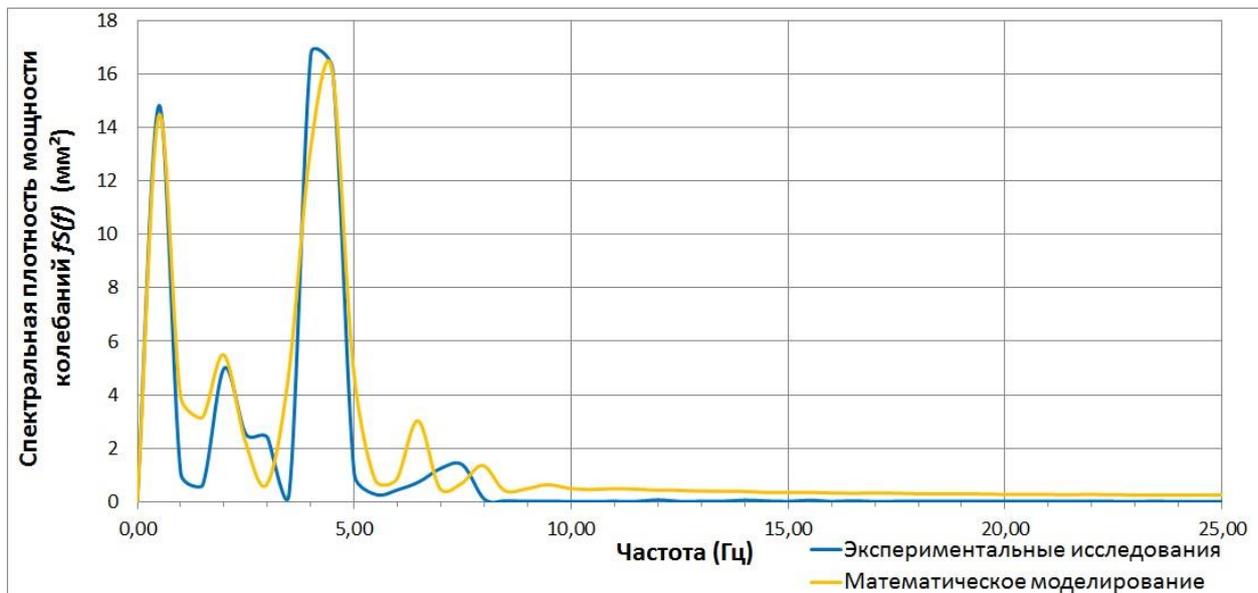


Рисунок 2 – Спектральная плотность мощности изгибных колебаний переднего антикрыла в 1-м характерном случае

Наибольшей энергией во 2-м характерном случае обладают колебания с частотами, близкими к 0,5 и 3,2 Гц. Также на спектре можно выделить множество пиков сосредоточенных в частотном диапазоне от 0 до 7 Гц.

В 3-м характерном случае большая часть энергии колебаний сосредоточена в районах 0,2, 2,1 – 3,4 и 7,4 Гц.

Данные, полученные в результате спектрального анализа, дают ясное представление о характеристиках колебаний переднего антикрыла гоночного автомобиля Даллара T12 во время езды по трассе.

Спектры, построенные по результатам моделирования, характеризуются незначительными расхождениями со спектрами, построенными по экспериментальным данным. Так, в частотной области от 0 до 10 Гц, расхождение между спектрами не превышает 20 %. В области частот больше 10 Гц, разница между результатами моделирования и экспериментальными данными увеличивается, это объясняется сложностью моделирования жесткостных и демпфирующих параметров корпуса автомобиля.

Таким образом, разработанная математическая модель адекватно имитирует поведение гоночного автомобиля Даллара T12 во время езды по гоночной трассе, поэтому может быть использована для анализа вибраций аэродинамических элементов и динамики движения, как этого скоростного транспортного средства, так и других, в том числе вновь проектируемых, при введении соответствующих корректировок.

В третьей главе проведен модальный анализ конечно-элементной модели переднего антикрыла гоночного автомобиля Даллара T12 для оценки вероятности возникновения резонанса, выполнены аэродинамические расчеты антикрыла без учета и с учетом его деформации, проанализировано влияние вибраций антикрыла на уровень генерируемой им прижимной силы.

В ходе модального анализа переднего антикрыла, выполненного с применением вычислительного комплекса ANSYS, были определены частоты первых десяти форм его собственных колебаний.

Наименьшая собственная частота, соответствующая первой форме колебаний составила 21,647 Гц, что существенно превосходит значения частот, полученных в результате спектрального анализа результатов экспериментальных исследований. В связи с этим можно сделать вывод, что на переднем антикрыле гоночного автомобиля Даллара T12 возникновение резонанса маловероятно. Тем не менее, при проектировании новых гоночных автомобилей, целесообразно проводить проверочный расчет на возможность возникновения резонанса всех аэродинамических элементов, генерирующих прижимную силу.

Для выполнения аэродинамического расчета (CFD- моделирования, от англ. computational fluid dynamics) переднего антикрыла был использован инструмент ANSYS Fluent. Аэродинамические расчеты были проведены для двух случаев: обдувание антикрыла с углом рыскания 20° на скорости 120 км/ч, соответствующее движению автомобиля в кривой, радиусом 50 м, и обдувание антикрыла с углом рыскания 6° на скорости 195 км/ч, соответствующее движению автомобиля в кривой, радиусом 100 м. Для анализа влияния вибраций антикрыла на уровень генерируемой им прижимной силы, в каждом случае были выполнены два расчета с недеформируемым и деформируемым антикрылом.

Исследование влияния вибраций конструкций на характеристики обтекаемого их потока воздуха, предполагает совместное решение механической и гидродинамической задач. Вибрации конструкции изменяют течение окружающих ее потоков воздуха, в результате чего изменяются аэродинамические нагрузки на поверхность конструкции, что в свою очередь приводит к изменению ее напряженно-деформированного состояния. Таким образом, моделирование подобных процессов подразумевает постоянный обмен данными между механической и аэродинамической задачей и требует значительных вычислительных ресурсов.

Аэродинамические расчеты деформируемого переднего антикрыла гоночного автомобиля Даллара T12, были ограничены временем в 4 с. Время расчета было разбито на 20 шагов, с длиной каждого шага равной 0,2 с. В момент времени, равный 2 с, к антикрылу прикладывалось ускорение, равное 300 м/с^2 , моделирующее удар при наезде на бордюр.

Расчетная область была разбита на элементы тетраэдральной формы. Пограничный слой был смоделирован плоскими элементами. Параметр турбулентности на выходе из расчетной области модели составил 5 %. Для моделирования турбулентности использовалась $k - \epsilon$ модель.

В ходе выполнения аэродинамического обдувания недеформируемого антикрыла с углом рыскания 20° на скорости 120 км/ч, были получены суммарные аэродинамические нагрузки на антикрыло, схемы распределения

давления и линии тока воздуха. Так суммарная прижимная сила составила $F_{пр} = 837$ Н, а суммарная сила лобового сопротивления $F_{лс} = 201$ Н.

Аналогичный расчет деформируемого антикрыла показал, что в момент времени 2,2 с происходили наибольшие деформации антикрыла, вызванные мгновенным приложением ускорения, моделирующего наезд на бордюр.

Резкое деформирование антикрыла, привело к дестабилизации потоков воздуха и появлению отрывных турбулентных течений, в результате чего давление на нижней поверхности антикрыла увеличилось и как следствие снизилось значение прижимной силы.

Сравнивая результаты аэродинамических расчетов деформируемого и недеформируемого антикрыльев можно сделать вывод, что из-за явления аэроупругости уровень прижимной силы уменьшается на 3,73 %, а при ударе, возникающем из-за наезда на бордюр, на 21,27 % по сравнению со значением, полученным при расчете недеформируемого антикрыла.

При выполнении аэродинамического расчета недеформируемого переднего антикрыла с углом рыскания 6° на скорости 195 км/ч, суммарная прижимная сила составила $F_{пр} = 2502$ Н, а суммарная сила лобового сопротивления $F_{лс} = 569$ Н.

Аэродинамический расчет деформируемого антикрыла, с углом рыскания 6° показал, что в момент времени 2 с, из-за сильных деформаций антикрыла, на задних кромках закрылков образуются отрывные турбулентные течения, что приводит к увеличению статического давления по всей нижней поверхности антикрыла и снижению значения прижимной силы.

На рисунке 3 показано распределение статического давления на поверхности деформируемого антикрыла в момент времени 2 с, в сравнении с распределением статического давления на поверхности недеформируемого антикрыла при аэродинамическом обдувании с углом рыскания 6° .

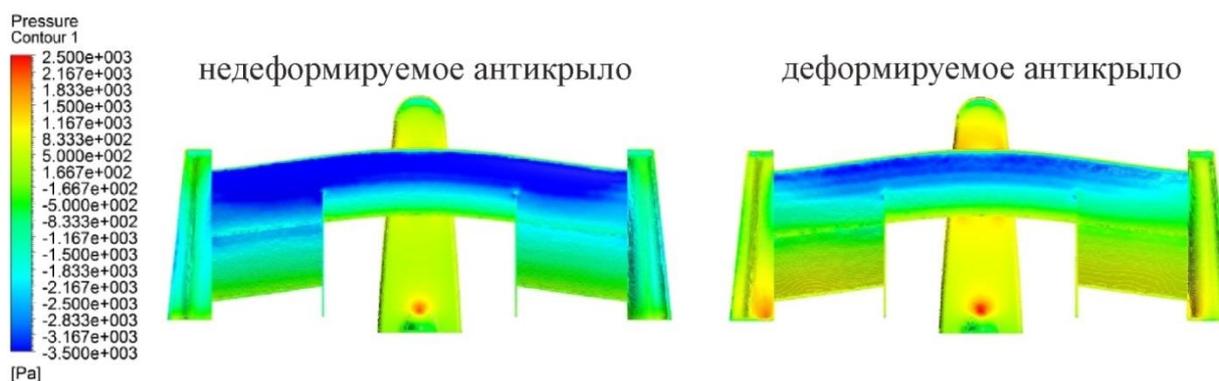


Рисунок 3 – Распределение статического давления на поверхности антикрыла при аэродинамическом расчете с углом рыскания 6° на скорости 195 км/ч

На рисунке 4 изображен график изменения значений прижимной силы и силы лобового сопротивления в зависимости от времени расчета при аэродинамическом обдувании деформируемого антикрыла с углом рыскания 6° . Анализируя этот график можно сделать вывод, что из-за явления аэроупругости уровень прижимной силы уменьшается на 10,15 % по

сравнению со значением, полученным при CFD-моделировании недеформируемого антикрыла.

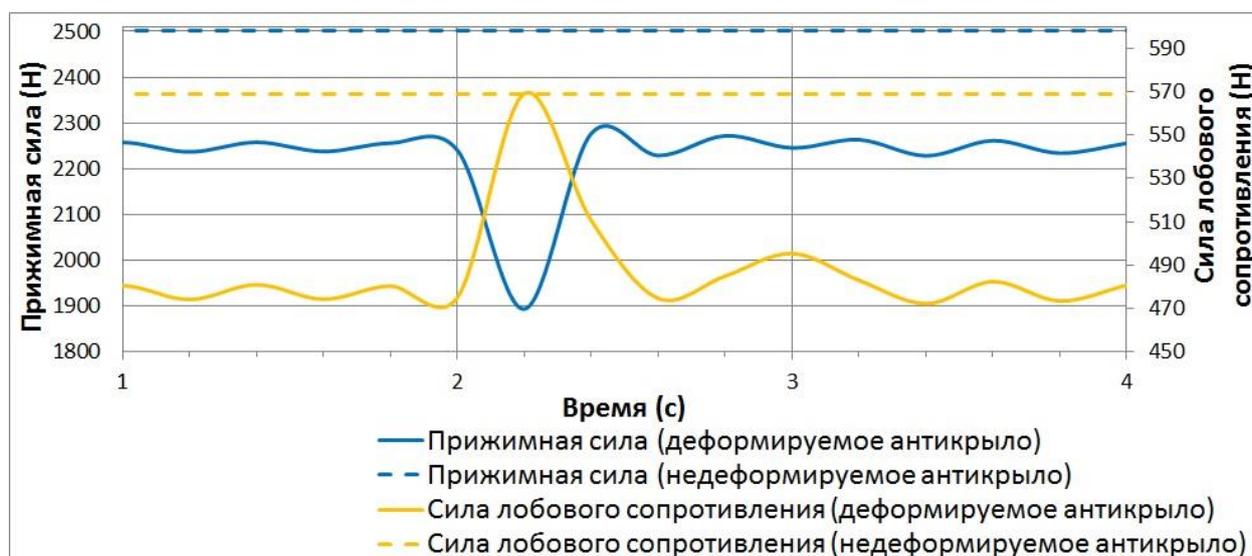


Рисунок 4 – График изменения прижимной силы и силы лобового сопротивления при аэродинамическом расчете с углом рыскания 6° на скорости 195 км/ч

В момент времени 2 с, когда образуются вихревые течения, обусловленные стремительной деформацией антикрыла, уровень прижимной силы падает на 24,34 % по сравнению со значением, полученным при CFD-моделировании недеформируемого антикрыла.

Такое снижение уровня прижимной силы из-за вибраций переднего антикрыла, снижает критическую скорость прохождения кривой на 1 – 2 %, и приводит к увеличению времени прохождения круга.

Также, из-за конструктивных различий между передним (консольная балка) и задним (защемленная по концам балка) антикрыльями, вибрации на переднем антикрыле происходят интенсивнее, что приводит к большему снижению прижимной силы на переднем антикрыле. Это изменяет баланс автомобиля при прохождении кривых и создает недостаточную поворачиваемость.

В четвертой главе предложены способ и система обеспечения устойчивости и улучшения управляемости гоночных автомобилей и других скоростных транспортных средств, за счет активного управления углом атаки закрылков антикрыльев.

Проблема снижения устойчивости скоростного транспортного средства в кривой, обусловленная вибрациями антикрыльев, может быть успешно решена реализацией разработанного в диссертации способа обеспечения устойчивости и улучшения управляемости скоростных транспортных средств в кривых малого радиуса.

Сущность этого способа заключается в установке системы автоматического управления, которая при изменении показателей устойчивости и управляемости будет вырабатывать активные воздействия на

закрылки антикрыльев скоростного транспортного средства, с целью обеспечения его стабильного движения.

Основным элементом системы управления, спроектированной для реализации этого способа, является программируемый логический контроллер, в который поступает информация о движении гоночного автомобиля с датчиков, измеряющих следующие параметры: скорость автомобиля (посчитанная по алгоритму блока управления двигателем), скорость каждого колеса автомобиля, продольное и поперечное ускорение автомобиля, угол поворота руля и давление в тормозной системе. Обработывая полученные входные сигналы по определенному алгоритму, контроллер вырабатывает управляющие воздействия на приводы механизмов изменения угла атаки закрылков антикрыльев.

В диссертации рассмотрена система обеспечения устойчивости, адаптированная для гоночного автомобиля Даллара T12. Исходя из компоновки этого автомобиля, управление осуществляется двумя закрылками переднего антикрыла, расположенных с его левой и правой стороны соответственно, и одним закрылком заднего антикрыла, расположенного вдоль всей его поверхности. Для активного управления закрылками используется гидравлический привод.

Первая часть алгоритма контроллера заключается в обеспечении устойчивого торможения перед входом в кривую. При торможении вес с задней оси автомобиля перемещается на переднюю, задние колеса разгружаются, и эффективность их торможения снижается. При нажатии водителем педали тормоза, резко увеличивается давление в тормозной системе. Этот сигнал контроллер рассматривает как начало торможения и увеличивает угол атаки заднего закрылка, в результате чего увеличивается прижимная сила на задней оси автомобиля, что способствует увеличению силы трения колес задней оси с дорогой и повышению эффективности их торможения.

При повороте автомобиля контроллер непрерывно отслеживает его управляемость, и определяет, склонен ли автомобиль к нейтральной, недостаточной или избыточной поворачиваемости. На основе этого вырабатываются необходимые управляющие воздействия на приводы механизмов изменения угла атаки закрылков.

Критерием оценки поворачиваемости является «теоретический угол поворота руля», необходимый и достаточный для прохождения кривой определенного радиуса с определенной скоростью. Величина этого угла определяется по формуле (23):

$$\alpha_{\text{теор}} = \arctg\left(\frac{L_{\text{авт}} a_n}{v_{\text{авт}}^2}\right) \frac{180}{\pi} i_{\text{рул.уп}}, \quad (23)$$

где $L_{\text{авт}}$ – база автомобиля; a_n – поперечное ускорение автомобиля, измеряемое датчиком; $v_{\text{авт}}$ – скорость автомобиля, посчитанная по алгоритму блока управления двигателем; R – радиус кривой; $i_{\text{рул.уп}}$ – передаточное число механизма рулевого управления.

Теоретический угол поворота руля $\alpha_{\text{теор}}$, постоянно сравнивается с реальным углом поворота $\alpha_{\text{реал}}$, измеряемым датчиком поворота руля.

Если $\alpha_{\text{реал}} = \alpha_{\text{теор}}$, то автомобиль обладает нейтральной поворачиваемостью. В этом случае контроллер не вырабатывает управляющих воздействий на приводы закрылков антикрыльев.

Если $\alpha_{\text{реал}} > \alpha_{\text{теор}}$, то автомобиль обладает недостаточной поворачиваемостью. Водитель вынужден поворачивать руль на больший угол для сохранения автомобиля на оптимальной траектории. В этом случае необходимо активное управление.

Первоначально проверяется необходимое условие по величине общего ускорения автомобиля a , представляющего собой геометрическую сумму векторов продольного ускорения a_{τ} и поперечного ускорения a_n . Изменение углов атаки закрылков возможно только при условии, когда $a > 1,5 g$. При меньших значениях общего ускорения автомобиля, осуществлять активное управление нецелесообразно.

При одновременном выполнении условий $\alpha_{\text{реал}} > \alpha_{\text{теор}}$ и $a > 1,5 g$, контроллер вырабатывает управляющие сигналы для компенсации недостаточной поворачиваемости. Сначала начинает увеличиваться угол атаки внутреннего (по отношению к центру кривой) закрылка переднего антикрыла. Если при достижении максимального угла атаки этого закрылка, $\alpha_{\text{реал}}$ все еще превышает $\alpha_{\text{теор}}$, то тогда начинает увеличиваться угол атаки внешнего (по отношению к центру кривой) закрылка переднего антикрыла. Если при достижении максимальных углов атаки закрылков переднего антикрыла, условие $\alpha_{\text{реал}} > \alpha_{\text{теор}}$ все еще выполняется, то контроллер вырабатывает управляющий сигнал на уменьшение угла атаки заднего закрылка, увеличенного при торможении перед входом в кривую, для создания избыточной управляемости автомобиля. После выхода из кривой и приравнения $\alpha_{\text{реал}}$ с $\alpha_{\text{теор}}$, контроллер возвращает закрылки в исходную позицию, снижая при этом лобовое сопротивление автомобиля.

Если $\alpha_{\text{реал}} < \alpha_{\text{теор}}$, то автомобиль обладает избыточной поворачиваемостью. Водитель поворачивает руль на меньший угол, поскольку угол поворота равный $\alpha_{\text{теор}}$ может привести к заносу автомобиля.

При выполнении условия $a > 1,5 g$, контроллер вырабатывает управляющие сигналы для компенсации избыточной поворачиваемости. Сначала начинает увеличиваться угол атаки закрылка заднего антикрыла. Если при достижении максимального значения угла атаки закрылка заднего антикрыла $\alpha_{\text{реал}}$ все еще меньше чем $\alpha_{\text{теор}}$, то тогда начинает уменьшаться угол атаки внешнего закрылка переднего антикрыла. Если при достижении максимального угла атаки закрылка заднего антикрыла, и минимального угла атаки внешнего закрылка переднего антикрыла, условие $\alpha_{\text{реал}} < \alpha_{\text{теор}}$ продолжает выполняться, то контроллер начинает уменьшение угла атаки внутреннего закрылка переднего антикрыла. После выхода из кривой закрылки возвращаются в исходную позицию.

При блокировке передних или задних колес автомобиля на торможениях, контроллер увеличивает угол атаки соответствующих закрылков антикрыльев.

Предложенный способ позволяет обеспечивать устойчивость и хорошую управляемость скоростных безрельсовых транспортных средств в условиях постоянного изменения внешних воздействий и параметров самих транспортных средств.

Программа контроллера написана на графическом языке программирования CFC в среде разработки CODESYS, и может выполнять параллельно множество процессов, повышая тем самым быстродействие системы обеспечения устойчивости.

Система обеспечения устойчивости реализует рациональное использование прижимной силы: в кривых малого радиуса при необходимости, система управления создает максимально возможный уровень прижимной силы, а на прямых участках трассы – минимальный, снижая, таким образом, лобовое сопротивление движению автомобиля. В результате создаются благоприятные условия для увеличения скорости, как в кривых, так и на прямолинейных участках трассы.

Для анализа работы системы обеспечения устойчивости и оценки ее быстродействия, эта система была смоделирована в среде MATLAB – Simulink и интегрирована в математическую модель гоночного автомобиля Даллара T12, рассмотренную во второй главе диссертации.

На рисунке 5 приведено сравнение скоростей движения гоночного автомобиля Даллара T12, оборудованного и необорудованного системой обеспечения устойчивости, во время прохождения одного круга трассы Моторлэнд Арагон.

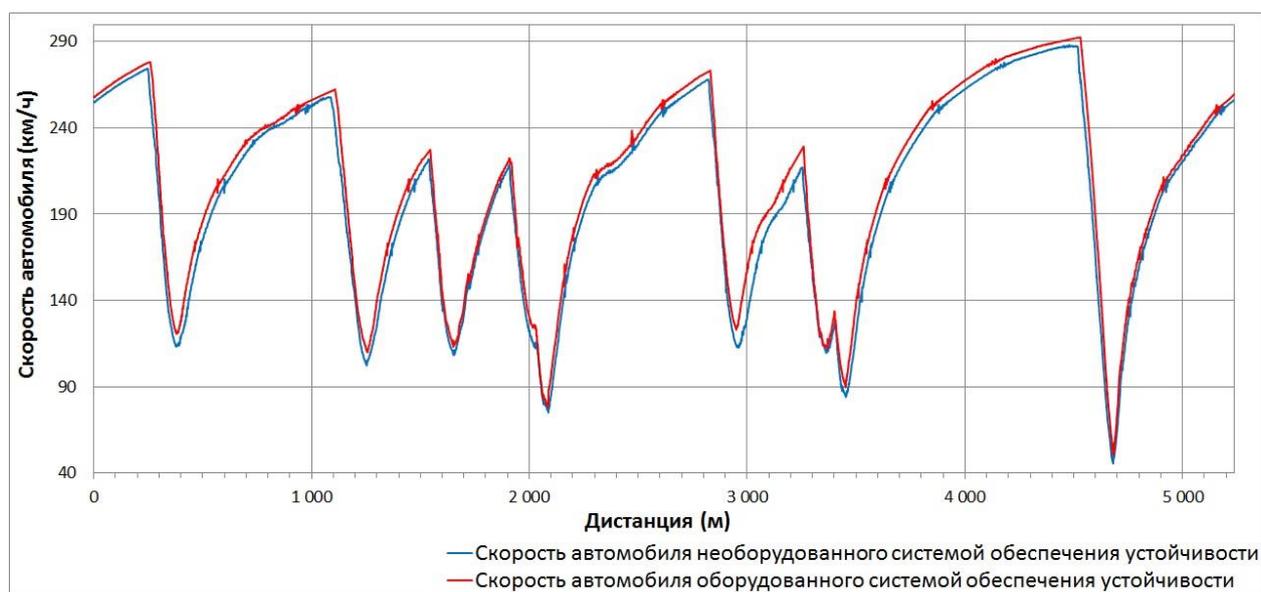


Рисунок 5 – Сравнение скоростей движения гоночного автомобиля Даллара T12 оборудованного и не оборудованного системой обеспечения устойчивости во время прохождения одного круга трассы Моторлэнд Арагон

Из рисунка 5 видно, что при прохождении кривых, скорость автомобиля, оборудованного системой обеспечения устойчивости, превосходит скорость автомобиля, необорудованного такой системой. Это объясняется использованием максимального уровня прижимной силы при прохождении кривых. На прямых участках трассы, за счет уменьшения углов атаки антикрыльев, сила лобового сопротивления уменьшается, позволяя автомобилю, оборудованному системой обеспечения устойчивости, развивать большую скорость. Этот эффект усиливается также тем, что начальные скорости разгона при выходе из кривых, превосходят скорости автомобиля, необорудованного системой обеспечения устойчивости.

В результате создается существенная разница во времени прохождения круга. Так, автомобиль, оборудованный системой обеспечения устойчивости, проезжает один круг трассы Моторлэнд Арагон за 98,82 с, в то время как автомобиль, не оборудованный такой системой, проезжает ту же дистанцию за 103,92 с. Разница в этом случае составляет 5,10 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена повышению устойчивости скоростных безрельсовых транспортных средств при прохождении кривых малого радиуса.

Впервые:

- разработана математическая модель движения скоростного транспортного средства, учитывающая влияние вибраций аэродинамических элементов, генерирующих прижимную силу, на устойчивость движения в кривых;
- исследовано влияние вибраций антикрыла на уровень генерируемой им прижимной силы;
- разработаны способ и система обеспечения устойчивости и улучшения управляемости скоростных безрельсовых транспортных средств при прохождении кривых малого радиуса на основе непрерывного сравнения реального угла поворота руля транспортного средства с теоретическим углом поворота, необходимым и достаточным для прохождения кривой в конкретных условиях.

Основные результаты работы:

1. Проведен анализ факторов влияющих на устойчивость скоростного транспортного средства при прохождении кривых. Рассмотрена изученность влияния каждого фактора на устойчивость скоростных транспортных средств. Выявлены основные направления исследований по повышению устойчивости скоростных транспортных средств. Установлено, что влияние вибраций аэродинамических элементов автомобилей, генерирующих прижимную силу, на устойчивость при прохождении кривых малого радиуса слабо изучено.

2. Проанализировано влияние прижимной аэродинамической силы на устойчивость скоростного транспортного средства в кривых. Установлено,

что увеличение прижимной силы повышает критическую скорость движения при прохождении кривых малого радиуса.

3. Проведены экспериментальные исследования вибраций переднего антикрыла гоночного автомобиля Даллара T12 при езде по гоночной трассе. Выделены три характерных случая, возникающих во время прохождения одного круга трассы. Методами спектрального анализа установлено, что во всех трех характерных случаях наибольшей энергией обладают колебания с частотой, не превышающей 7,4 Гц.

4. Разработана математическая имитационная модель движения гоночного автомобиля Даллара T12 для анализа вибраций его аэродинамических элементов, возникающих при езде по гоночной трассе. Для оценки адекватности модели было проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Расхождение в частотной области от 0 до 10 Гц не превысило 20 %.

5. Модальный анализ сборки переднего антикрыла гоночного автомобиля Даллара T12 показал, что возникновение резонанса переднего антикрыла маловероятно. Наименьшая собственная частота колебаний переднего антикрыла равняется 21,6 Гц, в то время как наибольшую мощность спектр колебаний антикрыла, полученный по результатам экспериментальных исследований, имеет в районе 1 – 5 Гц, а самый высокочастотный всплеск находится в районе 7,4 Гц.

6. Установлено, что вибрации антикрыла снижают уровень прижимной силы. Это происходит из-за срыва потока и образования вихревых течений. Так во время интенсивных деформаций антикрыла, уровень прижимной силы падает на 24,34% по сравнению со значением, полученным при аэродинамическом расчете недеформируемого антикрыла.

7. Разработаны способ и система обеспечения устойчивости и улучшения управляемости гоночных автомобилей и других скоростных безрельсовых транспортных средств, за счет активного управления углом атаки закрылков антикрыльев. Предложена идея непрерывного сравнения реального угла поворота руля автомобиля с теоретическим углом поворота, определяемым характеристиками движения автомобиля в каждый конкретный момент времени. Разработанная система позволяет гоночному автомобилю Даллара T12 проезжать один круг трассы Моторлэнд Арагон на 5,1 с быстрее.

Рекомендации. Разработанные в диссертации теоретические положения и технические решения могут быть использованы при проектировании новых конструкций отечественных гоночных автомобилей и других типов скоростных транспортных средств.

Имитационная модель гоночного автомобиля Даллара T12, обладает гибкой структурой и может быть адаптирована для анализа динамики движения других типов скоростных транспортных средств. Модель позволяет анализировать работу подвески автомобиля, условия комфортабельности водителя, работу трансмиссии и вибрации

аэродинамических элементов. Использование модели на стадии проектирования гоночных автомобилей позволит сэкономить значительные средства на проведение экспериментальных исследований.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Выполненный анализ влияния вибраций аэродинамических элементов на уровень генерируемой ими прижимной силы установил, что вибрации значительно (до 24 %, в зависимости от интенсивности) снижают эффективность использования аэродинамических элементов, поэтому актуальной представляется задача оптимизации конструкций аэродинамических элементов и их расположения на автомобиле, с целью снижения влияния явления аэроупругости и их вибраций в процессе эксплуатации, на уровень генерируемой ими прижимной силы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

В изданиях, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Минобразования Российской Федерации:

1. Сорокин, П. А. Анализ динамики шасси гоночного автомобиля Даллара T12 [Текст] / П. А. Сорокин, К. С. Хряков, М. Хоммерс // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – №5 (Ч. 2). – С. 231 – 240.

2. Сорокин, П. А. Спектральный анализ вибраций переднего антикрыла гоночного автомобиля Даллара T12 [Текст] / П. А. Сорокин, К. С. Хряков, А. В. Мишин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – №7 (Ч. 1). – С. 221 – 226.

3. Хряков, К. С. Анализ вибраций переднего антикрыла гоночного автомобиля Даллара T12 [Текст] / К. С. Хряков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – №5 (Ч. 2). – С. 218 – 225.

4. Хряков, К. С. Исследование форм и частот собственных колебаний переднего антикрыла гоночного автомобиля Даллара T12 [Текст] / К. С. Хряков, П. А. Сорокин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – №5 (Ч. 2). – С. 85 – 91.

5. Хряков, К. С. Проблемы эффективной работы аэродинамических элементов гоночных автомобилей [Текст] / К. С. Хряков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – №11 (Ч. 2). – С. 193 – 196.

В изданиях, не входящих в перечень, рекомендованный ВАК Минобразования Российской Федерации:

6. Хряков, К. С. Анализ управления частотой собственных колебаний металлоконструкции башенного крана путем изменения геометрии колебательного контура [Текст] / К. С. Хряков // Труды XVIII Московской международной межвузовской научно-технической

конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы». – М.: МАДИ, 2014. – Ч. 1. – Секция 1. – С. 116 – 118.

7. Хряков, К. С. Принцип действия системы управления устойчивостью башенного крана [Текст] / К. С. Хряков, А. В. Мишин // Труды XVIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы». – М.: МАДИ, 2014. – Ч. 1. – Секция 1. – С. 118 – 120.

8. Хряков, К. С. Система обеспечения устойчивости башенных кранов при ненормируемых внешних воздействиях [Текст] / К. С. Хряков // Труды X Международной научно-технической конференции «Trans-Mech-Art-Chem». – М.: МИИТ, 2014. – Секция 1. – С. 103 – 104.

9. Хряков, К. С. Система повышения устойчивости гоночных автомобилей при прохождении поворотов на больших скоростях [Текст] / К. С. Хряков, П. А. Сорокин // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства. Международная научно-практическая конференция (Красноярск, 7 – 8 апреля 2016 г.). – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. – Ч. 2. – С. 356 – 360.

Хряков Кирилл Станиславович

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКОРОСТНЫХ БЕЗРЕЛЬСОВЫХ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ КРИВЫХ
МАЛОГО РАДИУСА**

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов
и детали машин

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «03» ноября 2016 г. Заказ № ____ Формат 60x90/16

Тираж 80 экз.

Усл. – печ. л. – 1,5

УПЦ ГИ МГУПС (МИИТ), Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.