

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

**Чаплыгина Антона Владимировича**

«Улучшение наблюдаемости параметров движения автомобиля в системах активной безопасности», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 –  
«Колесные и гусеничные машины».

### Актуальность темы диссертации

Системы активной безопасности (САБ) автомобиля являются одним из основных средств предотвращения дорожно-транспортных происшествий. Для обеспечения своевременности и эффективности их управляющих и корректирующих воздействий эти системы должны быть обеспечены достаточным объемом информации о параметрах, характеризующих движение автомобиля. Часть необходимой информации может быть получена от бортового сенсорного обеспечения, включающего средства измерений ускорения, скорости рыскания автомобиля, угловых скоростей колес, угла поворота рулевого колеса и других переменных. Однако бортовые датчики серийных автомобилей не позволяют измерять все требуемые для работы САБ параметры. В частности, на борту недоступно измерение проскальзывания и коэффициента продольного сцепления шин, которые требуются для функционирования антиблокировочной системы (АБС), системы предотвращения буксования колес (ПБС) и функций контроля крутящих моментов на колесах, связанных с динамической стабилизацией автомобиля. Также затруднительно непосредственное измерение угла бокового увода колеса и коэффициента бокового сцепления шины, информация о которых необходима для работы системы курсовой устойчивости (ESP) и других функций динамической стабилизации.

В силу необходимости данных параметров для работы САБ их определение выполняется методами косвенных измерений. Для этого используются т.н. «виртуальные датчики», или наблюдатели, которые представляют собой математические модели, получающие на входы сигналы от бортовых датчиков и выдающие на выходы расчетные оценки неизмеряемых параметров. С появления первых САБ до настоящего времени системы косвенных измерений получили значительное развитие как в части состава идентифицируемых параметров, так и с точки зрения

качества идентификации. Они обеспечивают адекватную работу САБ в заданном диапазоне дорожных условий. Качество работы известных «виртуальных датчиков» снижается при движении автомобиля по опорным поверхностям с низким или неоднородным сцеплением. Также можно отметить недостаток прогностических свойств существующих алгоритмов идентификации максимального сцепления шин, что снижает возможности упреждающего срабатывания САБ. Рассмотренная диссертационная работа посвящена решению этих проблем и улучшению рабочих характеристик САБ путем совершенствования алгоритмов идентификации параметров движения автомобиля, что позволяет считать актуальность работы высокой.

### **Оценка структуры и содержания работы**

Диссертационная работа Чаплыгина А.В. состоит из введения, 4 глав основного текста, раздела основных результатов и выводов, списка использованных литературных источников и четырех приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 139 страниц машинописного текста (без приложений), включая 57 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 104 наименования. Структура диссертационной работы соответствует задачам, поставленным для достижения сформулированной цели исследования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы его цель и задачи, а также научная новизна и практическая значимость, перечислены результаты реализации и аprobации работы.

В первой главе представлена постановка задачи обеспечения наблюдаемости параметров движения автомобиля в системах активной безопасности, проведен анализ известных исследований в этой области, рассмотрены различные варианты наблюдателей переменных состояния динамических систем. В частности, проанализированы наблюдатели на основе линейного и нелинейных фильтров Калмана и наблюдатели на основе скользящих режимов. Представлены примеры использования наблюдателей этих типов в САБ. Также рассмотрены методы идентификации характеристик сцепления шин с опорной поверхностью, предложенные различными исследователями для использования в САБ. Кроме того, представлены исследования в области косвенной оценки угла продольного наклона дороги. По результатам проведенного анализа выделены недостатки существующих решений, отмечена необходимость их устранения и совершенствования систем идентификации параметров движения автомобиля, в связи с чем сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены описания разработанных алгоритмов идентификации параметров движения автомобиля и характеристик сцепления шин. Наблюдатель параметров курсового движения автомобиля

основан на математической модели движения автомобиля в плоскости дороги, измерениях угла поворота рулевого колеса, бокового ускорения и скорости рыскания автомобиля. В качестве средства коррекции расчетных оценок используется сигма-точечный фильтр Калмана. Наблюдатель параметров продольной динамики автомобиля основан на математических моделях вращения колес и связывающей их модели продольного движения автомобиля. В качестве измерений используются угловые скорости колес, расчетный крутящий момент двигателя и передаточное число трансмиссии. Коррекция расчетных оценок осуществляется наблюдателем на основе скользящего режима, с помощью которого идентифицируется продольный коэффициент сцепления. Для прогностической аппроксимации характеристик сцепления предложен алгоритм, основанный на накоплении оценок проскальзывания (или увода) и коэффициента сцепления шины с их последующей аппроксимацией с помощью нелинейной функции, параметры которой определяются с помощью градиентной оптимизации. В дополнение к перечисленным алгоритмам разработан оригинальный наблюдатель угла продольного наклона дороги, который основан на методе, названном «дискретно-накопительным», и в качестве входных сигналов использует измерения бортового акселерометра и оценку продольного ускорения автомобиля, получаемую от наблюдателя продольной динамики.

В третьей главе приведено описание математической модели, предназначеннной для использования в разработанной системе наблюдателей параметров движения автомобиля. Модель представляет собой динамическую систему, состоящую из шести масс (автомобиль, подпрессоренная масса, четыре вращающиеся массы колес). Для моделирования шин используются линейная и нелинейная аппроксимации характеристик сцепления, переключение между которыми осуществляется в соответствии с алгоритмами работы наблюдателей.

В четвертой главе описаны проведенные экспериментальные исследования и показаны их результаты. Представлено описание объекта испытаний – легкового автомобиля, на базе которого была реализована разработанная система наблюдателей, а также контрольного измерительного оборудования и выполненных испытаний, которые представляли собой маневры курсового и прямолинейного движения на поверхностях с высоким и низким сцеплением. Показаны примеры результатов идентификации параметров курсового движения, включая не измеряемые бортовой сенсорной системой: углы увода и коэффициенты бокового сцепления (в том числе максимальные). Представлены примеры результатов идентификации параметров продольной динамики: скорость автомобиля, проскальзывание шин, коэффициенты продольного сцепления. Описаны результаты аппроксимации характеристик бокового и продольного сцепления с помощью разработанного алгоритма. По результатам сделан вывод о прогностических свойствах предложенного

алгоритма. Численные оценки качества работы алгоритмов выполнены посредством среднеквадратических ошибок расчета контрольных параметров (ускорений, скорости рыскания, углов увода и т.д.) и коэффициентов детерминации, характеризующих корреляцию между реализациями характеристик сцепления (как случайных процессов) и их регрессионными моделями в виде нелинейных аппроксимаций.

В заключительном разделе представлены общие выводы по каждой из решенных задач исследования, приведены численные показатели адекватности и точности разработанных алгоритмов идентификации, а также обеспечиваемые ими показатели улучшения рабочих характеристик систем идентификации параметров движения автомобиля и параметров работы САБ на примере АБС.

Структура и содержание автореферата в достаточной мере отражают содержание диссертации.

### **Научная новизна диссертации**

Научную новизну рассмотренной диссертационной работы составляют:

– новая структура системы идентификации параметров движения автомобиля на основе нелинейных наблюдателей, математической модели движения автомобиля и данных измерений бортовой системы автомобиля. В рамках предложенной системы идентификации можно отметить оригинальные решения в части оценки продольного коэффициента сцепления шины с дорогой, в части уточнения оценки бокового коэффициента сцепления за счет использования нелинейной модели шины и наблюдателя на основе сигма-точечного фильтра Калмана, а также в части оценки угла наклона дороги за счет использования дискретно-накопительного метода идентификации.

– новый метод прогностической идентификации характеристик сцепления шин с дорогой, основанный на накоплении оценок проскальзывания (или углов увода) и текущего коэффициента сцепления, определяемых с помощью нелинейного наблюдателя, и последующей аппроксимации накопленных данных с помощью нелинейной модели шины и метода градиентной оптимизации.

### **Обоснованность и достоверность результатов и выводов**

Результаты проведенного исследования представляются достоверными, а выводы диссертационной работы – обоснованными, что можно подтвердить следующей аргументацией:

– описания предложенных алгоритмов идентификации параметров движения автомобиля и прогностической идентификации характеристик сцепления шин с дорогой основаны на корректном понимании динамических свойств автомобиля, сцепных свойств шин, принципов

математического моделирования и построения наблюдателей переменных состояния динамических систем;

– использование математических моделей, сигма-точечного фильтра Калмана, наблюдателя на основе скользящего режима и регрессионных моделей с оптимизационным поиском параметров представляется корректным и обоснованным;

– экспериментальное исследование проведено с использованием поверенного измерительного оборудования. Точность оценок, выполненных разработанными алгоритмами, подтверждена сравнением с контрольными измерениями, в результате которых были получены приемлемые величины среднеквадратических ошибок и коэффициентов детерминации. Также можно отметить, что полученные в результате работы алгоритмов идентификации характеристики сцепления шин согласуются с аналогичными характеристиками, представленными в ранее опубликованных экспериментальных исследованиях.

### **Теоретическая и практическая ценность результатов работы**

Теоретическую ценность диссертационной работы составляют предложенные в ней новые алгоритмические структуры, повышающие наблюдаемость параметров движения автомобиля, а также улучшающие прогнозируемость максимального сцепления шин с опорной поверхностью в продольном и боковом направлениях.

Практическую значимость работы составляют описания и программные реализации разработанных алгоритмов идентификации параметров движения автомобиля, которые могут использоваться в составе контроллеров различных САБ (в частности, АБС, ПБС, ESP).

### **Реализация результатов работы**

Результаты диссертационного исследования были использованы при выполнении трех научно-исследовательских работ по тематикам активной безопасности и автоматизации управления движением автомобилей в рамках государственных контрактов ФГУП «НАМИ» с Минпромторгом РФ и Минобрнауки РФ. Кроме того, результаты диссертационной работы нашли применение при написании учебно-методического пособия для использования в образовательном процессе аспирантуры ФГУП «НАМИ», что подтверждается полученным актом о внедрении.

### **Соответствие содержания диссертации научной специальности**

Диссертационная работа соответствует формуле научной специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины» и относится к двум областям исследований, определяемым паспортом специальности: п. 2 «математическое моделирование и исследование кинематики, статики и динамики, а также физико-химических процессов в транспортных

средствах, их узлах и механизмах» и п. 4 «повышение качества, экономичности, долговечности и надежности, безопасности конструкции, экологических характеристик и других потребительских и эксплуатационных параметров транспортного средства».

### **Публикация результатов диссертации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4-х научных статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций: перечень ВАК – 2 публикации, международная база цитирования Scopus – 2 публикации. Также основные результаты диссертации были представлены на международных научно-технических конференциях МАНФ и ААИ в 2019 – 2022 гг.

### **Замечания по диссертации и автореферату**

1. Используемая в работе модель взаимодействия колеса с опорным основанием MF, чрезмерно упрощена путем обнуления ряда коэффициентов. Возможно, следует рассмотреть верифицированные модели взаимодействия, изначально использующие два или три коэффициента (например, экспоненциальные зависимости, используемые в научной школе МГТУ им. Баумана, работы Рожденственского Ю.Л., Машкова К.Ю.).

2. В работе не приведен обзор и анализ моделей динамики колесных машин, которые аналогичны представленной в работе, то есть представляющих движение машины в виде плоского движения твердого тела с дополнительной системой уравнений для оценки перераспределений нормальных реакций под движителем.

3. Из рисунка 2.4 диссертации непонятно где (в каком блоке) в результате считается коэффициент буксования  $s_{xk11-22}$ .

4. В автореферате на рис. 14 аналогичные характеристики названы по-разному (факт. значение и реф.значение).

5. В работе имеются опечатки и неточности (в тексте за описанием определения угла продольного крена отсылают к пункту 2.3, где этого нет).

### **Заключение**

Рассмотренная диссертация является самостоятельной и завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи улучшения активной безопасности автомобиля посредством совершенствования алгоритмов идентификации параметров его движения. Диссертационное исследование имеет научную ценность и практическую значимость. Полученные автором результаты достоверны, выводы обоснованы. Автореферат диссертационной работы в достаточной мере отражает ее содержание и соответствует требованиям ВАК РФ.

Представленные замечания имеют рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки работы.

Выполненное исследование соответствует паспорту научной специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины» и критериям оценки диссертационных работ, изложенным в Постановлении Правительства РФ «О порядке присуждения ученых степеней».

Автор диссертации «Улучшение наблюдаемости параметров движения автомобиля в системах активной безопасности», Чаплыгин Антон Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины».

доцент кафедры  
«Многоцелевые гусеничные  
машины и мобильные  
роботы», д.т.н.

Стадухин А.А.

Научная специальность оппонента Стадухина Антона Алексеевича – 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины». Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук защищена 19.04.2021 г. в МГТУ им. Баумана, г. Москва.

Подпись А.А. Стадухина заверяю:



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.

Баумана (национальный исследовательский университет)»

105005 Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Тел.: 8 (499) 263-6391, официальный сайт: <https://bmstu.ru>