

«УТВЕРЖДАЮ»  
Ректор ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

М.В. Корняков

«28» 06 2022 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ») 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

Известно, что для обеспечения курсовой устойчивости и управляемости автомобиля системам активной безопасности (САБ) требуется информация о таких параметрах его движения, как коэффициенты сцепления шин с дорогой в продольном и боковом направлениях (в том числе их максимальные значения), продольное проскальзывание шин и боковой увод колес. Бортовые сенсорные системы серийных автомобилей не располагают средствами для прямого измерения этих параметров. В этой связи для их определения используются инструменты косвенной оценки, основанные на доступных на борту измерениях и математических моделях, которые часто называются «виртуальными датчиками», а в теории автоматического управления – наблюдателями. За время, прошедшее с появления первых САБ, до наших дней «виртуальные датчики» прошли значительный путь развития в аспектах расширения состава идентифицируемых ими параметров и повышения качества результатов идентификации. Этому способствовало как развитие компонентной базы бортовых вычислителей, так и совершенствование математического аппарата теории наблюдателей. Наряду с существенными достижениями в данной области «виртуальным датчикам» все еще свойственны недостатки, связанные со снижением их адекватности и точности в сложных дорожных условиях (в частности, при движении автомобиля по поверхностям с низким или переменным сцеплением), а также с ограниченными способностями в части прогнозирования максимального коэффициента сцепления (до момента

его фактического достижения). Эти вопросы являются важными для обеспечения превентивности срабатывания САБ и повышения эффективности создаваемых ими корректирующих воздействий. Таким образом, устранение недостатков «виртуальных датчиков»-наблюдателей и их совершенствование – это актуальное направление развития систем активной безопасности автомобилей и улучшения их рабочих характеристик.

### **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 перечню задач, поставленных для достижения сформулированной цели исследования.

*Во введении* дано обоснование актуальности темы диссертационного исследования, его цель и задачи, а также научная новизна, практическая значимость, результаты реализации и апробации.

*В первой главе* представлен анализ проблемы наблюдаемости параметров движения автомобиля, используемых системами активной безопасности, и инструментария, применяемого для идентификации неизмеряемых параметров. На основе структурно-функциональных описаний САБ составлены перечни измеряемых и неизмеряемых параметров, используемых в их работе. Проанализированы основные типы наблюдателей переменных состояния динамических систем. Проанализированы исследовательские работы, в которых наблюдатели этих типов используются при построении систем идентификации параметров движения автомобиля для использования в САБ. Рассмотрены различные методы идентификации характеристик сцепления шин, включая косвенную оценку с прогнозирующими свойствами. Также описаны методы косвенного определения угла продольного наклона дороги. В результате проведенного анализа установлены недостатки существующих решений в предметной области и, с их учетом, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

*Во второй главе* описана разработка новых алгоритмов идентификации параметров движения автомобиля. Перечислены требования к усовершенствованной системе идентификации и представлена структура системы, разработанной на основании этих требований. Описаны наблюдатели, составляющие разработанную систему: наблюдатель параметров курсового движения, основанный на нелинейной математической модели динамики автомобиля и сигма-

точечном фильтре Калмана, наблюдатель параметров продольной динамики автомобиля, основанный на математической модели с отдельными вращающимися массами колес и идентификации коэффициента сцепления с помощью скользящего режима, наблюдатель угла продольного наклона дороги на основе дискретно-накопительного метода идентификации. Также дано описание алгоритма идентификации характеристик сцепления шин с дорогой с прогностической оценкой максимального коэффициента сцепления. Алгоритм основан на накоплении данных, предоставляемых наблюдателями параметров движения, с последующей их нелинейной аппроксимацией, коэффициенты которой определяются с помощью градиентной оптимизации.

*В третьей главе* описана математическая модель динамики автомобиля, используемая в качестве основы для разработанных алгоритмов идентификации. Модель состоит из шести масс и использует нелинейные характеристики сцепления шин, аппроксимируемые известной эмпирической моделью Magic Formula.

*В четвертой главе* представлены результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов идентификации. Описаны объект испытаний (легковой автомобиль с вычислителем, реализующим разработанные алгоритмы), контрольное оборудование, использованное для получения эталонных измерений, а также выполненные испытательные маневры. Приведены и проанализированы результаты работы алгоритмов идентификации параметров движения автомобиля в маневрах на опорных поверхностях с высоким и низким сцеплением, в летних и зимних условиях. Представлены численные показатели точности идентификации. Также показаны характеристики бокового и продольного сцепления шин, идентифицированные при выполнении испытательных маневров. Прогностические свойства алгоритма идентификации подтверждены числовыми диапазонами коэффициентов сцепления, использованными для аппроксимации характеристик с оценкой их максимумов. Представлена оценка потенциала улучшения тормозных свойств автомобиля за счет использования разработанных алгоритмов идентификации в управлении антиблокировочной системой. Также описано исследование наблюдателя угла наклона дороги с оценкой, обеспечиваемой им точности идентификации в сравнении с фактическими наклонами метрологически-проверенных участков испытательных дорог.

В заключительном разделе обобщаются результаты разработки алгоритмов идентификации параметров движения автомобиля, сформулированы общие выводы по каждой из решенных задач диссертации, представлены численные показатели адекватности и точности разработанных алгоритмов, а также обеспечивающие ими показатели улучшения рабочих характеристик как самих систем

идентификации, так и оснащенных ими САБ. Выводы соответствуют структуре работы и являются научно-обоснованными.

**Список литературы** включает отечественные и зарубежные научные публикации в областях активной безопасности автомобиля, наблюдаемости динамических систем, методов косвенной оценки переменных состояния динамических систем и алгоритмов идентификации параметров движения автомобиля, используемых в системах активной безопасности.

### **Научная новизна диссертации**

В диссертационном исследовании получены следующие новые научные результаты:

1. Предложена и исследована новая структура системы идентификации параметров движения автомобиля на основе нелинейных наблюдателей, нелинейной математической модели движения автомобиля и данных физических измерений. В состав системы входят оригинальные решения в части оценки продольного коэффициента сцепления шины с дорогой (новая структура с использованием математической модели вращения колеса и наблюдателя на основе скользящего режима), в части уточнения оценки бокового коэффициента сцепления за счет использования нелинейной модели шины и наблюдателя на основе сигматочечного фильтра Калмана, а также в части оценки угла наклона дороги за счет использования дискретно-накопительного метода идентификации.

2. Предложен и исследован новый алгоритм прогностической идентификации характеристики коэффициента сцепления шины с дорогой, основанный на накоплении оценок проскальзывания (или 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**

При анализе диссертационной работы были отмечены следующие ее аспекты:

- аргументированное описание предлагаемых алгоритмов идентификации параметров движения автомобиля;
- обоснованное и корректное использование математического инструментария – моделей, оптимальных фильтров, наблюдателей и алгоритмов оптимизации;
- представлено экспериментальное подтверждение результатов исследования, которое выполнено с использованием поверенного измерительного оборудования. Точность расчетных оценок подтверждается численными характеристиками погрешностей

(среднеквадратическими ошибками и коэффициентом детерминации), определенными на основании контрольных измерений.

– Идентифицированные характеристики сцепления шин согласуются с результатами известных экспериментальных исследований, в которых аналогичные характеристики были получены посредством прямых измерений.

Отмеченные аспекты позволяют считать, что результаты и выводы, представленные в диссертационной работе, являются корректными и научно-обоснованными.

### **Теоретическая и практическая ценность результатов работы, рекомендации по их использованию**

Теоретическую ценность диссертационной работы составляют предложенные наблюдатели переменных состояния автомобиля на основе его нелинейной математической модели с применением сигма-точечного фильтра Калмана и скользящих режимов, а также алгоритм прогностической идентификации характеристик сцепления шин, использующий их нелинейную аппроксимацию, параметризация которой осуществляется с помощью градиентной оптимизации.

Практическую значимость представляют описания разработанных алгоритмов идентификации параметров движения автомобиля и их реализация в виде программного обеспечения, которое может быть адаптировано в составе контроллеров различных систем активной безопасности автомобиля – антиблокировочной, системы курсовой устойчивости, системы предотвращения буксования ведущих колес, функции активного рулевого управления.

Диссертационная работа и ее результаты могут быть рекомендованы в качестве методических материалов и источника практически полезной информации для исследователей, инженеров и аспирантов, работающих в областях динамики и активной безопасности автомобиля, занимающихся разработками систем активной безопасности.

### **Реализация результатов работы**

Результаты диссертационного исследования использовались при выполнении трех научно-исследовательских работ по тематикам активной безопасности и автоматизации управления движением автомобилей в рамках государственных контрактов ФГУП «НАМИ» с Министерством промышленности и торговли РФ (в 2020-2022 гг.) и Министерством образования и науки РФ (в 2019 г.). Также результаты диссертационной работы использовались при подготовке учебно-методического пособия для использования в образовательном процессе аспирантуры ФГУП «НАМИ», о чем свидетельствует полученный акт о внедрении.

## **Соответствие содержания диссертации научной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют формуле научной специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины» и относятся к двум областям исследований, указанным в паспорте 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 конструкций, экологических характеристик и других потребительских и эксплуатационных параметров транспортного средства».

## **Публикация результатов диссертации, соответствие автореферата ее содержанию**

Основные результаты проведенных соискателем исследований опубликованы в виде 4-х научных статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук (перечень ВАК – 2 публикации, международная база Scopus – 2 публикации).

Основные положения и результаты диссертации обсуждались на международных научно-технических конференциях в 2019 - 2022 гг.

Структура и содержание автореферата в достаточной мере отражают содержание диссертации.

## **Замечания по диссертации и автореферату**

1. В исследовании алгоритма идентификации параметров продольной динамики автомобиля (раздел 4.3 диссертации) не представлено движение в режиме торможения.

2. В исследование наблюдателя угла продольного наклона дороги (раздел 4.5 диссертации) было бы целесообразно включить дороги с переменным макропрофилем, контрольные измерения которого можно получить с помощью спутниковой навигационной системы.

3. Представленные в разделе 4.2 кривые, аппроксимирующие характеристики бокового сцепления, следовало бы построить отдельно для положительного и отрицательного увода.

4. Для уточнения математической модели динамики автомобиля, используемой в алгоритмах идентификации параметров движения, целесообразно было бы включить в нее боковой крен кузова.

## **Заключение**

Рассмотренная диссертация является самостоятельной и завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи совершенствования систем активной безопасности автомобиля путем повышения качества определения

параметров его движения. Диссертационное исследование имеет научную ценность и практическую значимость для автомобильной промышленности. Полученные автором результаты достоверны, выводы обоснованы.

Автореферат диссертационной работы в достаточной мере отражает ее содержание и соответствует требованиям ВАК РФ. Выполненное исследование соответствует паспорту научной специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины» и критериям оценки диссертационных работ, изложенным в Постановлении Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. «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» за новые научно обоснованные технические, технологические решения, направленные на совершенствование систем активной безопасности автомобилей, путем улучшения алгоритмов идентификации и прогнозирования параметров их движения, имеющие существенное значение для автомобильной отрасли страны.

Диссертация и отзыв рассмотрены и единогласно одобрены на заседании кафедры «Автомобильный транспорт» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)» (протокол № 10 от 27.06 2022 г.)

Федотов Александр Иванович  
Заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт»  
ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»,  
доктор технических наук, профессор  
e-mail: fai.abs@rambler.ru



Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Адрес: 664074 г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83; Тел.: +7 (3952) 405-100, Факс: +7 (3952) 405-100, e-mail: info@istu.edu, официальный сайт: <http://istu.edu>



Подпись Федотова А.И.  
ЗАВЕРЯЮ  
Общий отдел ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

