

## Развитие НТИ: проект «Учет динамики движения наземного беспилотного транспортного средства при разработке интеллектуальной системы управления»



**М. В. Алешин,**  
директор проектного офиса,  
Инжиниринговый центр  
«Центр компьютерного  
инжиниринга»  
СПб политехнического  
университета  
Петра Великого  
aleshin@compmechlab.com



**Хосе Луис Леоро  
Мендоза,**  
начальник отдела  
разработки механических  
конструкций,  
ООО Лаборатория  
«Вычислительная механика»,  
ООО «Политех-Инжиниринг»  
leoro@compmechlab.com



**А. В. Тарасов,**  
начальник отдела  
системного компьютерного  
инжиниринга  
и функциональной  
интеграции,  
ООО Лаборатория  
«Вычислительная механика»  
tarasov@compmechlab.com



**О. И. Клявин,**  
главный конструктор,  
ООО Лаборатория  
«Вычислительная механика»  
klyavin@compmechlab.com

*В статье рассмотрены вопросы разработки, практического использования программного модуля прогнозирования движения беспилотных автомобилей. Модуль был создан как составная часть интеллектуальной системы управления движением беспилотных автомобилей на высокой скорости (выше 40 км/ч). Изменения динамических характеристик транспортного средства имеют сложный, но закономерный математический механизм. Этот факт позволяет создать основу с ограниченным количеством предварительно рассчитанных маневров для описания поведения динамики транспортного средства на дорогах общего пользования.*

**Ключевые слова:** транспортное средство, динамические характеристики, программный модуль прогнозирования движения, искусственный интеллект, база данных.

**К**омплекс НИОКР «Учет динамики движения наземного беспилотного транспортного средства при разработке интеллектуальной системы управления» — проект ООО Лаборатория «Вычислительная механика» при непосредственном участии Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ), Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ. Координатором от университета является лидер рабочей группы «Технет» НТИ профессор, проректор по перспективным проектам СПбПУ А. И. Боровков.

Проект участвовал в конкурсе «Развитие НТИ» в 2016 г. и был поддержан Фондом содействия инновациям (грант ФСИ по конкурсу «Развитие НТИ», заявка НТИ-24979) с объемом финансирования 20 млн руб., при этом размер собственного финансирования исполнителем составил 6 млн руб. НИОКР соответствует тематике дорожной карты «Автонет» Национальной технологической инициативы.

Компания-разработчик с 2006 г. представляет на динамично развивающихся рынках свои услуги в области компьютерного проектирования XXI века — (Simulation & Optimization)-Driven Design; мульти- и

трансдисциплинарного, кроссотраслевого компьютерного и суперкомпьютерного инжиниринга (Computer-Aided Engineering, CAE; High Performance Computing, HPC-CAE. Входит в пятерку ведущих российских дистрибьюторов как по спектру распространяемых программных систем, так и по широте охвата различных отраслей промышленности, таких как: авиастроение (ОАО «Корпорация «Иркут», ОАО «НИАТ», ОАО «МВЗ им. М. Л. Миля», ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»), турбомашиностроение (ОКБ им. А. Люльки, ООО «Пратт энд Уитни-Рус», ООО «ДжиИ-Рус»), добыча нефти и газа (ООО «Технологическая компания Шлюмбергер», ОАО «ЦКБА»), автомобилестроение (ГАУ «Центр инновационного развития и кластерных инициатив» Самарской области, ОАО «КамАЗ»), атомная энергетика (АО «ОКБМ Африкантов»), железнодорожная техника (ООО «ТРТранс») и др.

Лабораторией «Вычислительная механика» выполняются работы в интересах многих зарубежных автомобильных инженерных компаний. Например, в 2012-2013 гг. в партнерстве с компанией EDAG для BMW AG реализовано более 35 проектов в сфере инжиниринга.

Проект «Учет динамики движения наземного беспилотного транспортного средства при разработке интеллектуальной системы управления» создавался для автопрома. Цель НИОКР — создание модуля прогнозирования параметров, определяющих динамику движения автомобиля (ППД), интеллектуальной системы принятия решений беспилотного наземного транспортного средства при помощи проведения полномасштабных виртуальных испытаний. Модуль создавался, как составная часть интеллектуальной системы управления движением беспилотных автомобилей на высокой скорости (выше 40 км/ч).

Данный проект значительно отличается от разработок аналогичных решений последних лет, которые велись на основании аналитических упрощенных вычислений. Здесь найдено более точное решение прогнозирования, так как были использованы цифровые двойники (Digital Twins) реальных ТС и современные компьютерные технологии.

Исследование динамики движения автомобиля в рамках проекта проводилось с использованием компьютерного моделирования путем решения нелинейных задач динамики и кинематики многомассовых систем в программном пакете кинематического анализа. Было проведено исследование методов разработки модуля прогнозирования параметров динамики движения беспилотного наземного транспортного средства, а также подготовительные работы к проведению параметризованных многовариантных виртуальных испытаний многомассовых кинематических (MBS) моделей транспортных средств для наполнения базы данных модуля. В ходе выполнения исследований стало очевидно, что базы данных по конечным маневрам недостаточно для учета динамики ТС и обеспечения безопасности движения. Для уточнения данных по динамике движения беспилотного ТС необходимо также оценивать состояние автомобиля на каждом элементарном отрезке траектории при реализации

конечного маневра. Для этого в состав модуля ППД решено добавить базу данных, прогнозирующую динамику автомобиля в краткосрочной перспективе для элементарных отрезков пути — база данных примитивных маневров.

Применение двух типов баз данных в составе модуля ППД позволяет перекрывать все возможные маневры беспилотного ТС в стандартных и нестандартных ситуациях и прогнозировать поведение ТС как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе (рис. 1). При этом размер баз данных остается ограниченным и позволяет осуществлять искусственному интеллекту беспилотного ТС их обработку в режиме реального времени.

Все разработанные в ходе НИОКР параметризованные математические многомассовые модели отлажены и проверены на адекватность при помощи виртуальных испытаний. Оценка результатов виртуальных испытаний показала высокую степень адекватности MBS-моделей ТС и их соответствие реальным прототипам.

Разработан специальный модуль системы управления инженерными расчетами, позволяющий запускать параметризованные виртуальные испытания MBS-моделей с применением данной системы в полуавтоматическом режиме и система автоматизации обработки результатов виртуальных испытаний MBS-моделей. Система сопоставляет входные и выходные параметры виртуальных испытаний, каталогизирует их, формирует в базу данных и осуществляет поиск экстремальных значений для последующего формирования каталога нормальных диапазонов и критических значений параметров движения беспилотного наземного ТС.

На основе проведенных исследований и разработок, уточнения перечня входных и выходных параметров модуля ППД, а также с учетом необходимости параллельного наполнения двух баз данных модуля создана матрица (перечень) виртуальных испытаний.

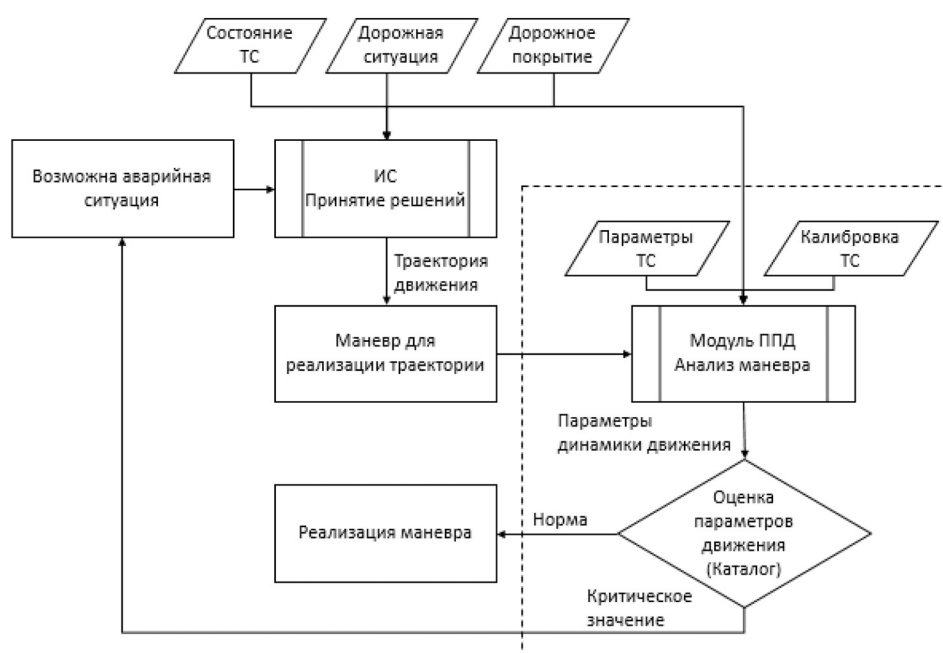


Рис. 1. Алгоритм встраивания модуля ППД в искусственный интеллект беспилотного автомобиля

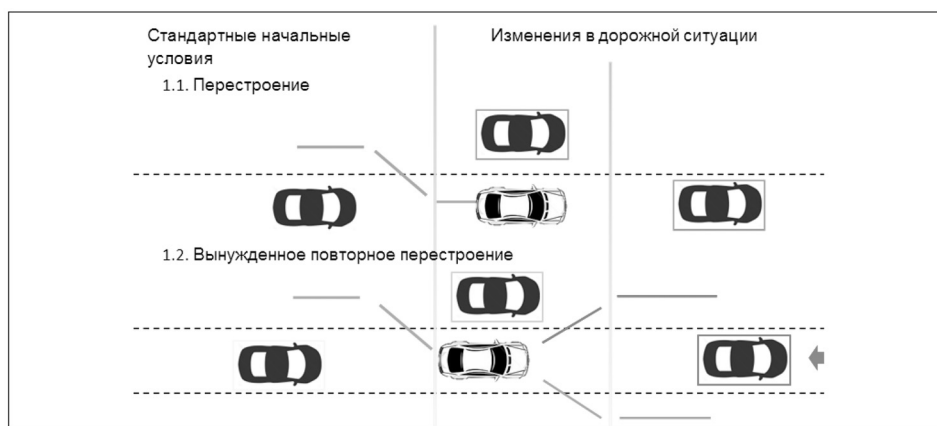


Рис. 2. Штатное и нештатное маневрирование автомобиля в потоке

В процессе разработки матрицы виртуальных испытаний, во взаимодействии с потенциальным потребителем, проводилась доработка перечня входных и выходных параметров для оптимизации размера базы данных и вычислительного времени.

Таким образом, разработана и апробирована методика создания модуля ППД, состоящего из двух взаимодополняющих баз данных; проверены виртуальными испытаниями математические много-массовые кинематические модели репрезентативных ТС трех основных категорий. Проведены отладочные параметризованные виртуальные испытания с использованием всех наработок с сокращенным количеством параметров, которые показали работоспособность и адекватность разработанных методик.

Основной задачей управления транспортом в этом проекте является выбор наиболее безопасной и эффективной (в части времени прохождения, комфорта) траектории движения на основе анализа дорожной обстановки и технического состояния транспорта в режиме реального времени. В этой связи задача интеллектуальной системы — взять на себя функции управления и полностью или частично заменить водителя, при этом учитывая многие факторы траектории движения. Таким образом, для движения по выбранной траектории ИС беспилотного ТС может варьировать управляющие воздействия, анализируя динамику и состояние автомобиля. Управляющие сигналы поступают от интеллектуальных систем, в зависимости от состояния дорожного покрытия, текущих параметров движения и технических характеристик транспортного средства. Использование такого модуля в составе интеллектуальных систем управления позволит улучшить возможности эффективного и безопасного применения беспилотных и других транспортных средств с интеллектуальными системами на дорогах общего пользования.

Чтобы обеспечить необходимую траекторию, человек, управляющий транспортом, выбирает управляющие воздействия, их количественное значение, тип и последовательность на основе опыта вождения. Однако практика показывает, что даже у опытных водителей велика вероятность ошибочного применения управляющих воздействий, что может привести к аварийным ситуациям и неэффективному движению

автомобиля. Во избежание аварийных ситуаций, связанных с некорректным использованием управляющих воздействий, в современном транспорте применяются различные системы помощи водителю: антиблокировочная система (ABS), противобуксовочная система (DTC), система курсовой устойчивости (ESP), система распределения тормозных усилий, система экстренного торможения, система помощи водителю (ADAS).

Разрабатываемый в рамках проекта модуль ППД ИС определяет параметры устойчивости, управляемости и динамики движения, определяющие динамику автомобиля, при применении управляющих сигналов в зависимости от состояния дорожного покрытия, текущих параметров движения и параметров ТС. Тем самым разрабатываемый модуль является частью ИС принятия решения и формализует опыт субъекта, управляющего ТС, на основе виртуального моделирования динамики транспорта.

Искусственный интеллект беспилотного наземного ТС на основе анализа дорожной обстановки определяет траекторию дальнейшего движения и необходимые для ее реализации управляющие сигналы и маневры. Модуль ППД ИС дает прогноз основных параметров движения беспилотного ТС при реализации данных управляющих сигналов, который служит основой принятия решения интеллектуальной системой о допустимости и эффективности их применения (рис. 2).

В дальнейшей работе над проектом определялись параметры движения автомобиля, количественные характеристики управляющих сигналов, коэффициенты трения и т. д., имеющие значение для безопасности управления ТС. Так, по параметрам движения в ходе разработки модуля ППД ИС определяются нормальные и критические значения. Достижение одним из параметров движения критических значений означает опасность совершения выбранного маневра либо невозможность реализации выбранной траектории (рис. 3). Например, уменьшение силы сцепления с дорогой при достаточной величине бокового ускорения может привести к потере управляемости ТС (заносу).

По итогам реализации проекта получены следующие результаты:

- создан программный модуль прогнозирования параметров движения для интеграции в интеллект-



Рис. 3. Отклонение автомобиля от траектории при перестроении на скорости 100 км/ч при различных коэффициентах сцепления с дорогой

туальную систему беспилотного ТС для легкового, грузового автомобилей, автобусов;

- разработан каталог нормальных диапазонов и критических значений параметров движения беспилотного ТС.

Модуль ППД ИС предполагается на рынок в качестве кастомизированного (адаптированного под запросы каждого потребителя) продукта: для его использования в составе ИС беспилотного наземного ТС он должен быть настроен под конкретную модель автомобиля. Для обеспечения возможности кастомизации конечного продукта проекта под различные модели ТС предполагается создание параметрической расчетной математической модели. Это позволит в кратчайшие сроки генерировать модуль ППД ИС для конкретной модели на основе параметров, определяющих динамику транспортного средства путем задания в расчетной модели и запуском автоматической многовариантной виртуальной расчетной оценки матрицы параметров движения ТС.

Можно отметить, что существует несколько специализированных программных систем, функционально близких к продукту проекта. Вместе с тем не было выявлено случаев применения этих или аналогичных решений непосредственно в составе интеллектуальных систем управления.

Область применения продукта, полученного в результате НИОКР, — интеллектуальные системы беспилотных наземных транспортных средств различных классов для движения по дорожной сети общего пользования. Модуль ППД предполагается использовать в качестве составной части интеллектуальной системы принятия решений для прогнозирования поведения ТС при применении искусственным интеллектом беспилотного наземного ТС тех или иных управляющих воздействий.

Разработанная в рамках проекта технология применима в автомобилестроении, производстве специальной техники, машиностроении.

Проект обладает высокой экономической эффективностью, обеспеченной высоким спросом на разработ-

ку. Беспилотный (автономный) транспорт — ключевой тренд современного автомобилестроения и область основной конкуренции в автопромышленной отрасли.

Инновационный продукт позволяет:

- снизить потребность в дорогостоящем и трудоемком обучении ИС с водителем для каждой отдельной модели ТС;
- уменьшить время реакции ИС за счет расширения временной перспективы как фактора принятия решений;
- улучшить управляющие сигналы для оптимизации расхода топлива и уменьшения износа;
- повысить безопасность применения ИС.

При использовании в составе ИС ТС за счет анализа отклонений между прогнозируемыми и наблюдаемыми результатами управляющих воздействий модуль ППД позволит оценивать техническое состояние ТС. В случае если обнаруживается критическое отклонение наблюдаемых последствий управляющих воздействий от прогнозных, система может идентифицировать неполадки шасси ТС.

Наработки проекта могут использоваться как основа моделирующего ядра виртуального полигона для обучения ИС. Виртуальные полигоны позволяют набирать практически неограниченный «накат» (опыт), моделировать маловероятные и опасные ситуации. По сравнению с видеозаписями, объекты виртуальной реальности не нуждаются в дополнительном аннотировании. Качество обучения ИС на виртуальном полигоне напрямую зависит от точности используемой математической модели, при этом распространенные детальные модели слишком требовательны к вычислительным ресурсам, а упрощенные модели не обеспечивают необходимой точности.

Методика разработки может продаваться конечному производителю как продукт.

В мире существует более 30 компаний, чья деятельность так или иначе связана с разработкой беспилотных автомобилей и которым разрабатываемый в рамках проекта продукт может быть потенциально интересен: Apple; Audi (Volkswagen Group); Baidu; BMW, Intel

и Mobileye; Bosch; DAF, Daimler, Iveco, MAN, Scania, Volvo; Delphi; Ford; General Motors, Lyft; Google, Fiat Chrysler Automobiles; Honda; Hyundai; Jaguar Land Rover; Mercedes-Benz (Daimler AG); Microsoft; Nissan, Renault; Nvidia; PSA Groupe; Tata Elxsi; Tesla; Toyota; Uber; Volkswagen; Volvo; Yutong и др.

Отдельной категорией компаний, которые могут быть заинтересованы в продукте, являются разработчики систем поведения беспилотного транспортного средства различных категорий (легковые автомобили, специализированные пассажирские транспортные средства, грузовые автомобили различной грузоподъемности) под действием управляющих сигналов искусственного интеллекта. В России лидером по разработке таких систем является компания Cognitive Technologies. В мире наиболее известна фирма Mobileye, до недавнего времени сотрудничавшая с Tesla. Кроме того, продукт может представлять интерес для множества стартапов, занимающихся аналогичными разработками в интересах ведущих автопроизводителей.

Применяемое в продукте проекта решение актуально и для военных наземных беспилотных транспортных средств, которые могут быть предназначены для разведки и наблюдения, и/или огневой поддержки на местности. По оценкам аналитиков мировой рынок военных беспилотных наземных транспортных средств к 2026 г. достигнет объема в \$707,8 млн (среднегодовой темп роста 4,76%).

По прогнозу аудиторской компании PriceWaterhouseCoopers, первые беспилотные автомобили появятся на дорогах уже через 3 года, в 2021 г. Однако их автономность будет неполной, водителю придется контролировать процесс езды в отдельных случаях. Спустя еще десятилетие, в 2030-х гг., транспортные средства перестанут нуждаться в человеке. А к 2040 г. транспортная система городов будет уже полностью беспилотной, т. е. автономной.

Согласно исследованиям Json & Partners (при построении прогнозов принимались во внимание оценки таких компаний, как JP Morgan, BI Intelligence, Statista, PWC, HIS, BCG, GSMA, Navigant research, Continental AG, McKinsey, Lux Research, P&C, McKinsey и других), основной прирост рынок беспилотных автомобилей получит с 2025 г., когда крупные автопроизводители, особенно китайские, начнут массово запускать автономные автомобили. В стоимостном выражении ежегодные продажи самоуправляемых автомобилей вырастут с \$13,65 млрд в 2017 г. до \$364,8 млрд к 2035 г. В региональной структуре основной объем самоуправляемых автомобилей будет приходиться на продажи в Китае, США и европейских странах.

Сегодня повышенное внимание к концепции создания беспилотных наземных транспортных средств наблюдается и в российской автомобильной промышленности. Такие отечественные автопроизводители, как КамАЗ, Волгас, ФГУП НАМИ, ведут проекты по созданию беспилотных транспортных средств в партнерстве с разработчиками систем автоматического управления (Google, Uber, Baidu, Cognitive Technologies, КБ Аврора и другие). Разрабатываемый проект уже получил поддержку компании ПАО «КамАЗ», разработка

велась при консультации команды, специализирующейся на интеллектуальных системах.

По оценкам рабочей группы «Автонет» НТИ, рынок частично и полностью беспилотных автотранспортных средств и комплексных решений и услуг на их основе к 2035 г. достигнет \$3 трлн. Сегменты: беспилотные транспортные средства специализированного назначения, сенсоры и специализированное программное обеспечение, системы управления транспортными потоками и интеллектуальными транспортно-логистическими системами, модульные грузоперевозки, кооперативные пассажироперевозки, новое поколение информационно-транспортных систем для БПТС, кастомизация БПТС, совершенствование старых транспортных средств.

Поскольку приоритетным направлением проекта является российский рынок, предлагаемая технология позволит глобально повысить конкурентоспособность российских производителей, что не только повысит уровень обеспечения населения российскими товарами высокого качества, но и способствует импортозамещению и импортоопережению.

В ходе реализации проекта планируется защита интеллектуальной собственности на все полученные патентоспособные результаты проекта, в частности:

- разработанный программный модуль ППД ИС;
- база данных математических моделей воздействий на транспортное средство для разработанного модуля ППД ИС.

Отдельным направлением продвижения продукта на рынок будет его развитие для интеллектуальных систем управления других типов ТС, в частности беспилотных летательных аппаратов, подводных и надводных систем. Данное направление подразумевает тесное сотрудничество с рабочими группами НТИ «Автонет», «Технет», «Аэронет», «Маринет».

## **The National technology initiative (NTI) development: «Vehicle dynamics prediction in the development of autonomous vehicle intelligent control system» project**

**M. V. Aleshin**, project office director, Center of computer-aided engineering, St. Petersburg polytechnic university.

**Jose Luis Leoro Mendoza**, head of the department of mechanical development, Computational mechanics laboratory, Polytech-engineering.

**A. V. Tarasov**, head of the department of systems computer-aided engineering, Computational mechanics laboratory.

**O. I. Klyavin**, chief-designer, Computational mechanics laboratory.

In this article the author considers the issues of the development and practical use of the software module predicting the motion of unmanned vehicles. Vehicle Dynamics Prediction Module was created as an application for self-driving hardware assistance for high velocities maneuvering (above 40km/h). The dynamic characteristics of a vehicle have a complex mathematical mechanism, but have a regularity character. This fact allows us to create a basis with a limited number of pre-calculated maneuvers to describe the behavior of the vehicle dynamics for maneuvering in public roads.

**Keywords:** vehicle, dynamic characteristics, vehicle dynamics prediction module, artificial intelligence, database.