На правах рукописи

Ендачев Денис Владимирович

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОМОБИЛЯ

05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в **Государственном научном центре Российской Федерации – Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт» (ФГУП «НАМИ»).**

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Нагайцев Максим Валерьевич

Официальные оппоненты: **Горелов Василий Александрович**,
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана),
профессор кафедры «Колесные машины»

Макаров Владимир Сергеевич,
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
доцент кафедры «Автомобили и тракторы»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»**

Защита состоится 23 ноября 2016 г. в 14 ^{00}
на заседании диссертационного совета Д 217.014.01 при ФГУП «НАМИ» по адресу: 125438, г. Москва, Автомоторная ул., д.2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НАМИ» и на сайте www.nami.ru по ссылке: http://nami.ru/directions/scientific-activity/dissertation-council

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу, ученому секретарю диссертационного совета, а копии присылать на e-mail: rinat.kurmaev@nami.ru

Автореферат разослан « 20 » сентября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент Курмаев Ринат Ханяфиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Беспилотный автомобиль – транспортное средство, оборудованное системой автоматического управления, которое может передвигаться без человека на борту.

Активная разработка беспилотных АТС ведущими зарубежными автопроизводителями началась в 80-ых годах 20-го века. Объектами исследований данного направления являются легковые автомобили, грузовой транспорт, сельскохозяйственная техника, техника военного назначения, «внутризаводской» транспорт, обеспечивающий ведение всех транспортных работ в современных логистических центрах и на складских территориях.

Работы по созданию беспилотных автомобилей ведут все мировые автопроизводители, особенно в США, Германии, Японии, Италии, Китае, Великобритании, Франции, Корее (автоконцерны General Motors, Ford, Mersedes Benz, Volkswagen, Audi, BMW, Volvo, Caddilac). Значительный объем работ проводится по закрытой тематике в рамках оборонного заказа, и по этой причине результаты исследований практически не публикуются в открытой печати. Сложные наукоемкие технические решения, программное обеспечение, датчики систем управления беспилотных АТС во многих странах отнесены к продукции двойного назначения.

Основными преимуществами беспилотных АТС являются:

- возможность перевозки грузов в опасных зонах, во время природных и техногенных катастроф или военных действий;
- снижение затрат на транспортировку грузов и пассажиров;
- снижение затрат на топливо и более эффективное использование пропускной способности дорог за счёт централизованного управления транспортным потоком;
- экономия временных ресурсов;
- расширение возможностей использования автомобиля для людей с ограниченными возможностями;
- минимизация ДТП и числа человеческих жертв в них;

Ряд систем автоматического управления транспортным средством полагается на вспомогательную инфраструктуру (например, использование сенсоров, встроенных в дорогу), однако более прогрессивныее технологии позволяют симулировать присутствие человека на уровне принятия решений об ориентации траспортного средства и величины скорости движения, благодаря набору камер, сенсоров, радаров и систем спутниковой навигации.

Существует два основных направления создания таких систем:

1. комплексная автоматизация автомобиля;
2. автоматизация отдельных режимов движения транспортного средства (*парковка, движение в пробках, перемещение по автомагистрали*).

Комплексный подход к созданию беспилотного автомобиля на сегодняшний день реализуют только две компании – Google и РобоСиВи.

В настоящее время разрабатываются и внедряются различные системы автоматической парковки, обеспечивающие параллельную и (или) перпендикулярную парковку автомобиля в автоматическом режиме. Парковочный автопилот имеют в активе BMW, Ford, Mercedes-Benz, Nissan, Opel, Toyota, Volkswagen.

Дальнейшее совершенствование системы адаптивного круиз-контроля в перспективе позволит реализовать автоматический режим движения автомобиля в пробках. В данном направлении проводят исследования компании Audi, Ford. Разработки BMW, Cadillac по автоматизации движения автомобиля по автомагистрали основываются на существующих системах активной безопасности.

Анализ систем управления беспилотных АТС выявил большое число проблем, возникающих перед конструкторами в процессе их разработки и при определении требований, предъявлямых к системе управления, что обусловлено следующми объективными факторами: достаточно высокой погрешностью, невозможностью большинства систем учитывать непрерывно изменяющиеся в процессе движения внешние условия, функциональной ограниченностью систем управления в связи с использованием внешних источников информации, определяющих положение транспортного средства в пространстве. В то же время очевидно, что качество работы системы управления напрямую определяет безопасность движения, и разработчики на стадии проектирования техники обязаны определить эксплуатационный скоростной диапазон, в котором вероятность возникновения аварийной ситуации мимнимальна.

В этой связи задача прогнозирования характеристик криволинейного движения беспилотных АТС на стадии проектирования с учетом временных задержек измерительных, вычислительных и исполнительных устройств является актуальной.

Цели и задачи. Целью работы является обеспечение безопасности движения беспилотных АТС в заданной внешней среде за счет выбора рациональных параметров систем управления движением на стадии проектирования.

Для достижения цели работы определены и последовательно решены следующие основные задачи:

- проведен обзор и анализ информации, касающейся разработок беспилотных АТС в отечественном и зарубежном автомобилестроении;
- разработана математическая модель динамики беспилотного АТС с учетом особенностей функционирования систем управления движением;
- разработан метод выбора рациональных параметров систем управления движением беспилотного АТС на стадии проектирования;
- проведены экспериментальные исследования движения беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina» с целью оценки адекватности и точности разработанной математической модели;
- проведены теоретические исследования динамики беспилотного АТС на совокупности дорожных условий при выполнении типовых маневров при различных параметрах системы управления движением;
- на основе разработанного метода обоснован выбор технических решений для реализации систем управления беспилотным АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina».

Методы исследований. Исследования проводились с использованием численных методов моделирования движения беспилотного АТС с учетом особенностей системы управления движением. Экспериментальные исследования проведены с использованием современных методов испытаний автомобильной техники на устойчивость и управляемость при установившемся криволинейном движении и при движении по переходным траекториям. В качестве объекта исследований выбрано беспилотное АТС, созданное в ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina».

Научная новизна заключается:

- в создании математической модели криволинейного движения беспилотного АТС по ровному горизонтальному недеформируемому опорному основанию, пригодной для исследования влияния временных задержек, связанных с качеством работы систем управления, на безопасность движения. Модель отличается от известных учетом работы регистрирующей и вычислительной аппаратуры, а также исполнительных устройств;
- в методе выбора рациональных параметров систем управления движением беспилотными АТС, позволяющем определить границы безопасного выполнения маневров на стадии проектирования техники;
- в результатах теоретических исследований криволинейного движения беспилотного АТС при заданных управляющих воздействиях, соответствующих выполнению как стандартизированных испытаний (маневр «переставка»), так и оригинальных (движение по заранее заданному маршруту), на опорных основаниях с различными сцепными свойствами и при различных временных задержках по исполнению управляющего сигнала.

Практическая ценность работы. На основе результатов выполненных исследований для практического использования при разработке систем управления движением беспилотным АТС создан комплекс программ для ЭВМ. Использование комплекса позволяет имитировать динамику беспилотного АТС и проводить оценку влияния задержки управляющего воздействия на безопасность движения в различных дорожных условиях, в результате чего возможно обосновано подходить к формированию технических требований к системам управления движением, что позволяет обеспечить безопасность при эксплуатации беспилотных АТС. Полученные в работе результаты использованы при создании беспилотного АТС на базе серийного автоомбиля «LADA-Kalina».

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», специализирующемся, в том числе, на разработке роботизированных транспортных систем, в НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана и используются в учебном процессе при подготовке инженеров на кафедре СМ-10 «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты диссертационной работы являются составной частью исследований, выполняемых ГНЦ ФГУП «НАМИ» при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ПНИ (соглашение №14.625.21.0006, уникальный идентификатор проекта RFMEFI62514X0006).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались:

- на научно-технических семинарах ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» в 2012…2015 гг. (г. Москва);

- на международной конференции Ассоциации автомобильных инженеров «Техническое регулирование в области транспортных средств» в 2012-2015 (г. Дмитров);

- на международных научных симпозиумах МГМУ «МАМИ» в 2012-2015 гг. (г. Москва);

- на международном форуме «Проблемы энергосбережения и экологии автомобильной техники» (ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва, 2013 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 научных работ, из которых 5 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 183 листах машинописного текста, содержит 95 рисунков, 7 таблиц. Библиография работы содержит 93 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, заключающейся в прогнозировании характеристик криволинейного движения беспилотного транспортного средства, разработанного на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina», с целью обеспечения безопасности, приведено также краткое содержание выполненных исследований, сформулирована цель работы и отражены основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе диссертации приведен обзор и анализ отечественных и зарубежных работ, посвященных созданию беспилотных АТС. Исследован опыт отечественных и зарубежных разработчиков по созданию систем управления движением, рассмотрены основные преимущества и недостатки известных программных, адаптивных и автономных систем управления, применяемых при создании беспилотных АТС.

Особенно отмечены разработки: DARPA; Google; Armament Research, Development and Engineering Center; Oshkosh Defense; Lockheed Martin; Mira Autonomous Control Equipment; Ruag Defence; Torc Robotics; Kairos Autonomi; Selex ES; Oto Melara; G-Nius; ПАО «КАМАЗ», ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» и др.

Проведенный анализ современного состояния вопроса, посвященного созданию беспилотных АТС, подтвердил интерес к данному направлению со стороны как отечественных, так и зарубежных разработчиков в силу широких возможностей, обусловленных исключением человеческого фактора из процесс управления транспортным средством. Однако были также выявлены и недостатки, которые являются сдерживающим фактором развития этого направления.

В итоги главы были вынесены основные задачи, решение которых необходимо для достижения цели работы, чему и посвящены остальные главы диссертации.

Во второй главе представлена математическая модель криволинейного движения беспилотного АТС, в состав которой входит система управления движением.

Движение беспилотного АТС, как твердого тела, рассматривается в горизонтальной плоскости на ровной недеформируемой опорной поверхности и складывается из поступательного движения центра масс и вращательного движения вокруг центра масс (рисунок 1). Система уравнений (1),

описывающая данное движение, позволяет рассчитать текущие ускорения по значениям сил и моментов, действующим на транспортное средство.

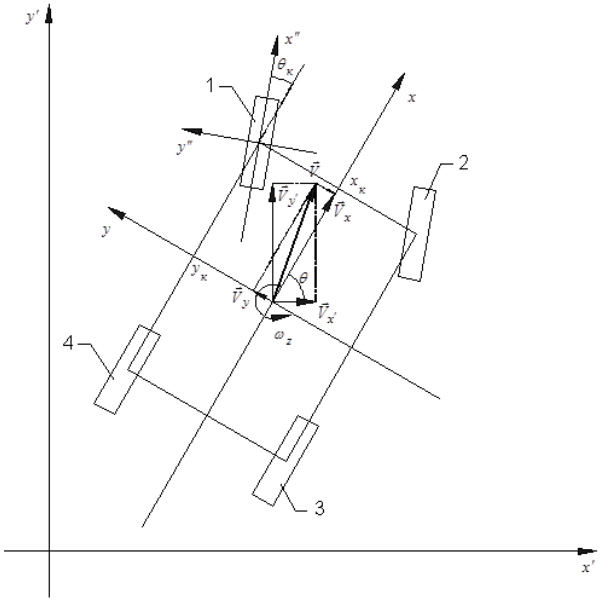


Рисунок 1 – Расчетная схема к определению положения корпуса АТС

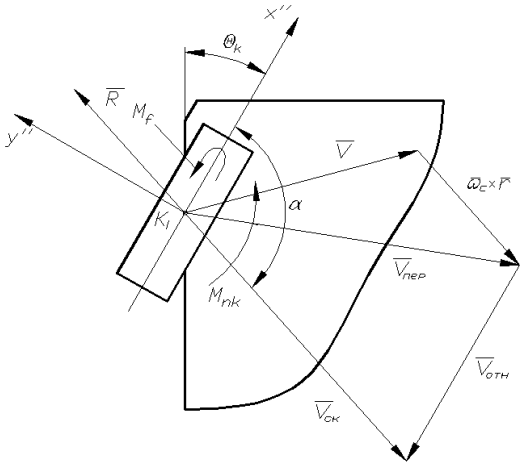


Рисунок 2 – Расчетная схема взаимодействия колеса с опорной поверхностью

$$\begin{cases} a_x = \dfrac{dV_x}{dt} - \omega_z \cdot V_y = \dfrac{1}{m} \cdot \left(\sum\limits_{i=1}^{4} R_{xi} - m \cdot g \cdot \sin(\alpha) - P_{wx} \right); \\ a_y = \dfrac{dV_y}{dt} + \omega_z \cdot V_x = \dfrac{1}{m} \cdot \left(\sum\limits_{i=1}^{4} R_{yi} - P_{wy} \right); \\ J_z \cdot \dfrac{d\omega_z}{dt} = \sum\limits_{i=1}^{4} M_{пкi} + \sum\limits_{i=1}^{4} M\left(\vec{R}_i\right); \\ V_{x'} = \dfrac{dx'}{dt} = V_x \cdot \cos\theta - V_y \cdot \sin\theta; \\ V_{y'} = \dfrac{dy'}{dt} = V_x \cdot \sin\theta + V_y \cdot \cos\theta; \\ \omega_z = \dfrac{d\theta}{dt}, \end{cases} \qquad (1)$$

где m – масса беспилотного АТС автомобиля; J_z - момент инерции беспилотного АТС относительно оси z; $\vec{V}$ - вектор скорости центра масс беспилотного АТС; $\vec{a}$ - вектор ускорения центра масс беспилотного АТС (абсолютная производная от вектора скорости центра масс); $\dfrac{d\vec{V}}{dt}$ - относительная производная от вектора скорости центра масс беспилотного АТС; $\vec{\omega}$ - вектор угловой скорости поворота беспилотного АТС; θ - угол поворота беспилотного АТС относительно оси x'; x', y' - координаты центра масс беспилотного АТС в неподвижной системе координат; x-y - подвижная

система координат, связанная с корпусом АТС; $\vec{R}_i$ - вектор силы взаимодействия с опорной поверхностью, действующей на i-ое колесо; $\vec{P}_w$ - вектор силы сопротивления воздуха; $M_{пкi}$ - момент сопротивления повороту i-го колеса.

Нормальные реакции R_{zi}, необходимые для определения силы $\vec{R}_i$ находятся из решения следующей системы уравнений с учетом того, что концы их векторов лежат в одной плоскости:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{4} R_{zi} = m \cdot g \cdot \cos\ \alpha; \\ \sum_{i=1}^{4} R_{zi} \cdot x_i + \sum_{i=1}^{4} M_{f_i} + P_{w_x} \cdot H_{w_x} = -m \cdot H_z \cdot (g \cdot \sin\ \alpha + a_x); \\ \sum_{i=1}^{4} R_{zi} \cdot y_i + P_{w_y} \cdot H_{w_y} = -m \cdot a_y \cdot H_z, \end{cases} \quad , \tag{2}$$

где x_i, y_i – координаты i-го колеса в подвижной системе координат x-y, H_z - высота центра масс беспилотного АТС, H_{w_x}, H_{w_y} - высоты точки приложения сил воздушного сопротивления в лобовой и боковой проекциях, соответственно.

Значения нормальных реакций R_{zi} должны быть ≥ 0. Если одна (или несколько) из нормальных реакций получается отрицательной, то эта реакция (реакции) принимается равной нулю и система решается заново (соответственно число уравнений уменьшается). Если при решении системы уравнений получаем два и более отрицательных значения R_{zi}, тогда останавливаем процесс численного моделирования, так как этот режим соответствует опрокидыванию автомобиля.

Величина силы взаимодействия с опорным основанием составит:

$$R = \mu_s \cdot R_{zi}, \tag{3}$$

где μ_S - коэффициент взаимодействия, являющийся функцией направления скольжения α, величины скольжения S и максимального коэффициента взаимодействия с опорным основанием $\mu_{s\max}$:

$$\mu_s = f(\mu_{s\max}, \alpha, S). \tag{4}$$

Коэффициент буксования:

$$S = \frac{V_{ск}}{\omega_к \cdot r_{ko}}, \tag{5}$$

где r_{ko} - радиус колеса в свободном режиме качения.

Вектор силы взаимодействия с опорным основанием $\vec{R}_i$ направлен противоположно вектору скорости скольжения $\vec{V}_{ск}$.

Величина момента сопротивления качению колеса M_{f_i}, действующего в плоскости его вращения, рассчитывается по формуле:

$$M_{f_i} = f \cdot R_{zi} \cdot r_{ko}, \tag{6}$$

где f - коэффициент сопротивления прямолинейному движению колеса.

Трансмиссия переднеприводного беспилотного АТС с симметричным дифференциалом описывается следующей системой уравнений :

$$\begin{cases} J_к \cdot \dot{\omega}_{к1} = \dfrac{M_{12}}{2} \cdot U_{ГП} \cdot \eta_{ГП} - M_1; \\ J_к \cdot \dot{\omega}_{к2} = \dfrac{M_{12}}{2} \cdot U_{ГП} \cdot \eta_{ГП} - M_2; \\ \dfrac{\dot{\omega}_д}{U_{ГП} \cdot U_{КПi}} = \dfrac{\dot{\omega}_{к1} + \dot{\omega}_{к2}}{2}; \\ (J_д \cdot U^2_{КПi} + J_{КПi}) \cdot \dfrac{\dot{\omega}_д}{U_{КПi}} = M_д \cdot U_{КПi} \cdot \eta_{КП} - M_{12}, \end{cases} \quad (7)$$

где $J_к$ – момент инерции колеса, $J_д$ – момент инерции двигателя, $J_{КПi}$ – момент инерции вращающихся частей коробки передач на *i*-ой передаче, $\dot{\omega}_{кi}$ – угловое ускорение *i*-го колеса, M_i – момент сопротивления на *i*-ом колесе, M_{12} – момент сопротивления, приведенный к выходному валу коробки передач, $\dot{\omega}_д$ – угловое ускорение вала двигателя, $M_д$ – момент, развиваемый двигателем, $U_{КПi}$ – передаточное число коробки передач на *i*-ой передаче, $U_{КПi}$ – передаточное число главной передачи, $\eta_{ГП}$ - КПД главной передачи, $\eta_{КП}$ - КПД коробки передач.

$$M_i = R_{ix''} \cdot r_д + M_{mi} + M_{f_i}, \quad (8)$$

где M_{mi} - тормозной момент на i-ом колесе; $R_{ix''}$ – проекции вектора силы взаимодействия с грунтом на оси системы координат $x'' - y''$; $r_д$ – расстояние от оси колеса до опорной поверхности.

Схема трансмиссии беспилотного АТС с колесной формулой 4×2 представлена на рисунке 3.

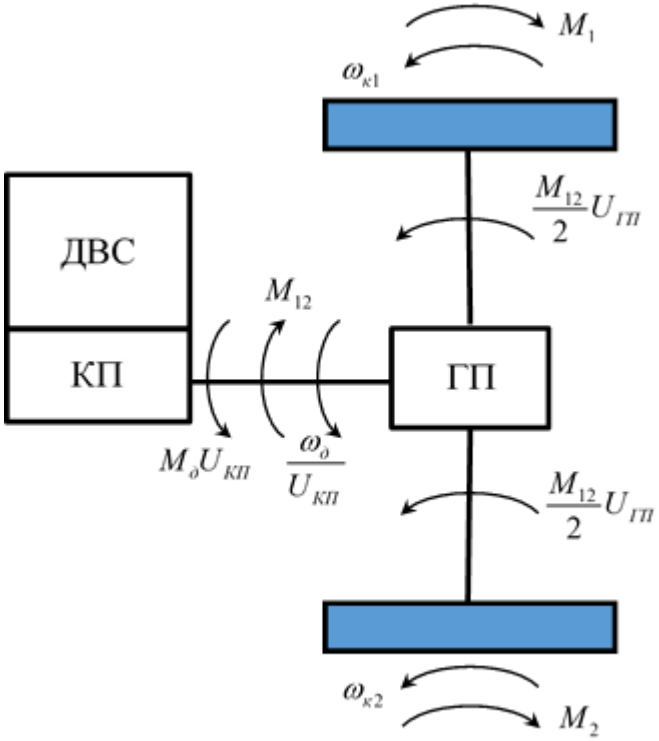


Рисунок 3 – Схема трансмиссии беспилотного АТС с колесной формулой 4×2

Для беспилотного АТС при определении момента сопротивления повороту $M_{пкi}$ целесообразно воспользоваться не теорией бокового увода, а использовать следующие зависимости:

$$\begin{cases} M_{пк} = \dfrac{M_{пкMAX}}{1 + \dfrac{0{,}15}{k(s) \cdot B_K}}; \\ M_{пкMAX} = 0{,}375 \cdot \mu_{\max} \cdot R_{zi} \cdot \sqrt{\dfrac{\pi L_K B_K}{4}}, \end{cases} \quad (9)$$

где $M_{пк}$ – момент сопротивления повороту одиночного колеса, катящегося по дуге кривизной $k(s)$, $M_{пкMAX}$ – максимальный момент сопротивления повороту на месте одиночного колеса, L_K, B_K – длина и ширина отпечатка шины, соответственно

Динамика рулевого колеса описывается уравнением:

$$J_{рул} \cdot \ddot{\alpha} = M_{пр}, \quad (10)$$

где α – угол поворота рулевого колеса (соответственно, $\ddot{\alpha}$ – его угловое ускорение); $J_{рул}$ – момент инерции деталей рулевого управления, приведенный к рулевому колесу; $M_{пр}$ – момент, приложенный со стороны электродвигателя к рулевому колесу.

За счет изменения момента на рулевом колесе происходит его перемещение из текущего положения в желаемое по пропорционально-интегро-дифференциальному закону:

$$M_{пр} = k_p \cdot (\alpha_{жел} - \alpha) + k_i \cdot \int_0^t (\alpha_{жел} - \alpha) dt + k_d \frac{d\left(\alpha_{жел} - \alpha\right)}{dt}, \quad (11)$$

где $\alpha_{жел}$ – желаемый угол поворота рулевого колеса, k_p, k_i и k_d – передаточные коэффициенты (соответственно, пропорциональный, интегральный и дифференциальный).

При этом необходимо учитывать, что полученная таким образом величина момента не должна превышать величины максимального момента, развиваемого электродвигателем:

$$\left|M_{пр}\right| \le M_{эд.\max}, \quad (12)$$

Для упрощения переменная является дискретной и имеет пять возможных значений, одно из которых соответствует прямолинейному движению автомобиля.

Общий вид модели представлен на рисунке 4.

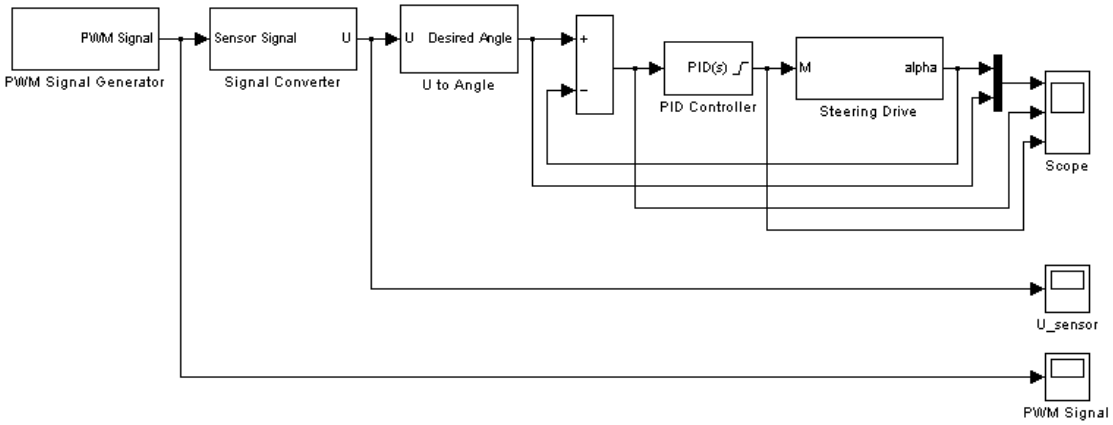


Рисунок 4 – Модель системы рулевого управления беспилотного АТС в ПК MATLAB/Simulink

В состав модели входят:

1) блок PWM Signal Generator, задающий сигнал с широтно-импульсной модуляцией как входной параметр всей системы. Изменение ширины импульса этого сигнала соответствует изменению величины желаемого угла поворота рулевого колеса. Содержимое блока представлено на рисунке 5.

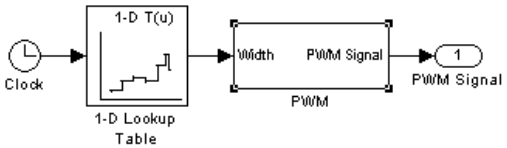


Рисунок 5 – Блок PWM Signal Generator в ПК MATLAB/Simulink

2) блок Signal Converter, преобразующий ШИМ-сигнал в напряжение. Содержимое блока представлено на рисунке 6.

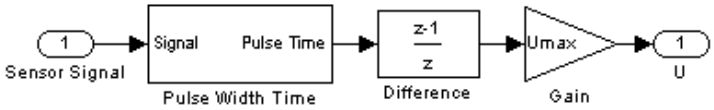


Рисунок 6 – Блок Signal Converter в MATLAB/Simulink

3) блок U to Angle, который переводит значение напряжения в величину желаемого угла поворота рулевого колеса.

Численное моделирование движения беспилотного АТС с реализованной системой управления проводилось в пакете Simulink системы Matlab. Исследовалось движение на следующих типах опорного основания: с низкими и высокими сцепными свойствами: «лед» ($\mu_{s\max}$ = 0,3; f = 0,02) и «асфальт» ($\mu_{s\max}$ = 0,8; f = 0,02).

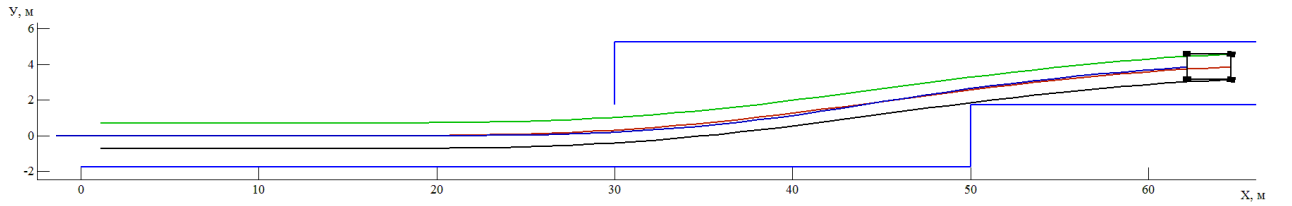
<u>В третьей главе</u> приведены результаты теоретических исследований криволинейного движения беспилотного АТС на различных типах опорного основания. Разработана методика проведения имитационных испытаний по оценке маневренности, управляемости и устойчивости беспилотного АТС. В качестве типового маневра для исследования характеристик криволинейного

движения беспилотного АТС в соответствии с ГОСТ Р 52302-2004 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний» выбран маневр «Переставка $S_П = 20$ м».

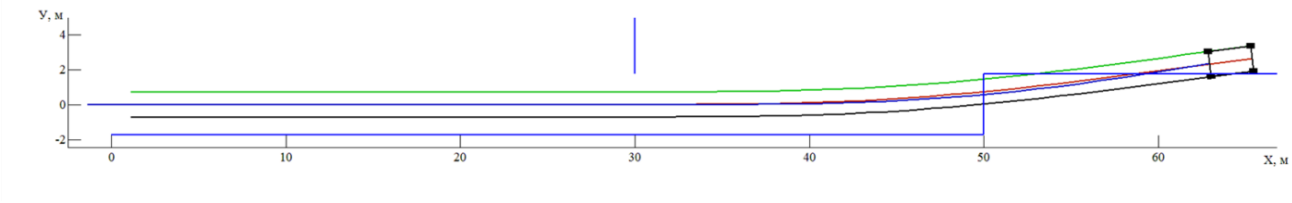
При проведении теоретических исследований по выполнению манёвра «Переставка $S_П = 20$ м» для беспилотного АТС для каждой скорости уточнялись максимальные углы поворота задающего (рулевого) колеса, момент времени, соответствующий началу управляющего воздействия, а также время задержки сигнала управляющего воздействия, обусловленное характеристикой системы управления беспилотным АТС.

Оценочным параметром для данного маневра является предельно возможная скорость выполнения при заданной величине задержки управляющего воздействия.

На рисунке 7 представлены траектории выполнения маневра «Переставка $S_П = 20$ м» при различной временной задержке управляющего воздействия.



а)



б)

Рисунок 7 – Траектория выполнения маневра «Переставка»: а - время задержки управляющего сигнала 0 с.; б – время задержки управляющего сигнала 0,5 с

Для беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina» определены максимальные скорости безопасного выполнения маневра «Переставка $S_П = 20$ м» на опорном основании – «асфальт» (максимальный коэффициент сцепления – 0,8) с различным временем задержки сигнала управляющего воздействия, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Максимальные скорости безопасного выполнения маневра

V_{max}, *км / ч*	94	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Δt, *с*	0,02	0,03	0,16	0,29	0,37	0,54	0,66	0,71	0,84	0,89

Для исследования характеристик криволинейного движения беспилотного АТС при движении по заданному маршруту, смоделирована трасса шириной *H* = 3,75 м, соответствующая ГОСТ 52399-2005 «Геометрические элементы автомобильных дорог». Заданная кривизна

поворотов, имитация пересечения перекрестка преследует цель максимально приблизить теоретическое исследование динамики беспилотного АТС к реальным условиям эксплуатации. Движение беспилотного АТС осуществлялось на ровном твердом опорном основании – «асфальт». Время задержки управляющего воздействия увеличивалось до момента выхода беспилотного АТС из коридора движения, что позволило определить максимальную скорость успешного прохождения трассы без потери устойчивости и управляемости.

На рисунке 8 представлена траектория движения беспилотного АТС при успешном прохождении заданной трассы.

Выбранная стратегия управления позволила обеспечить безопасное движение на всей протяженности трассы. Для прохождения участка трассы с поворотом 90^0 скорость беспилотного АТС должна быть снижена до 11 км/ч.

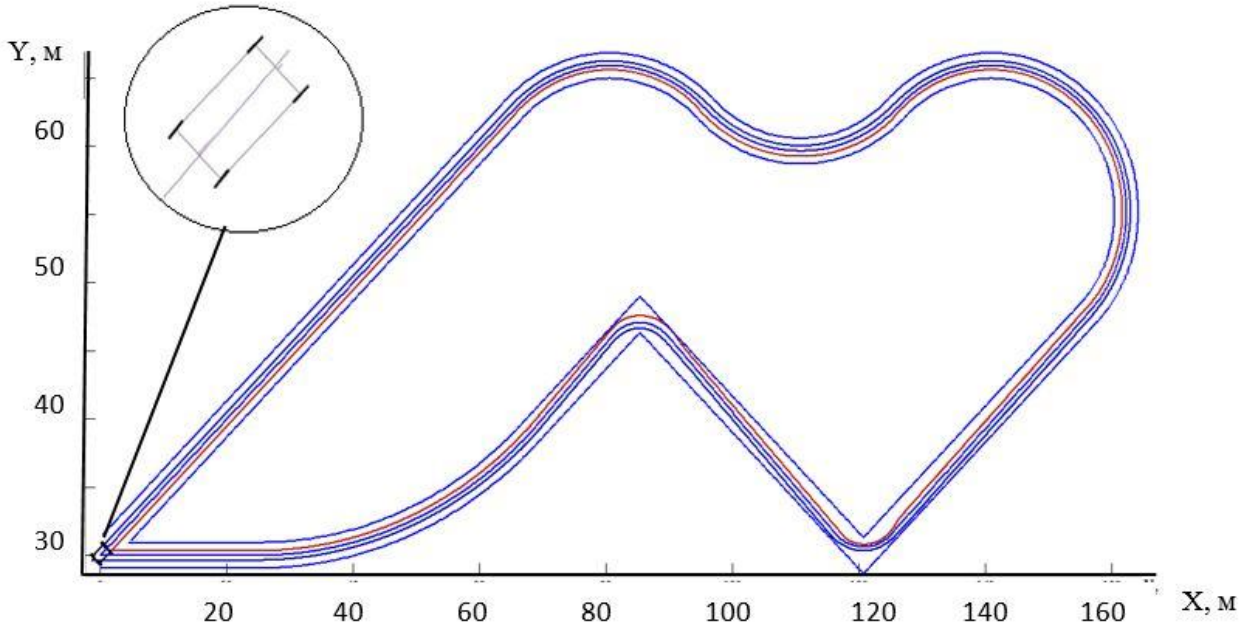


Рисунок 8 – Движение беспилотного АТС по заданной трассе

Полученные в работе результаты позволили обосновать выбор параметров системы управления движением беспилотного АТС для успешного и безопасного прохождения заданного маршрута. На рисунке 9 представлена состав исполнительного устройства системы управления движением беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina».

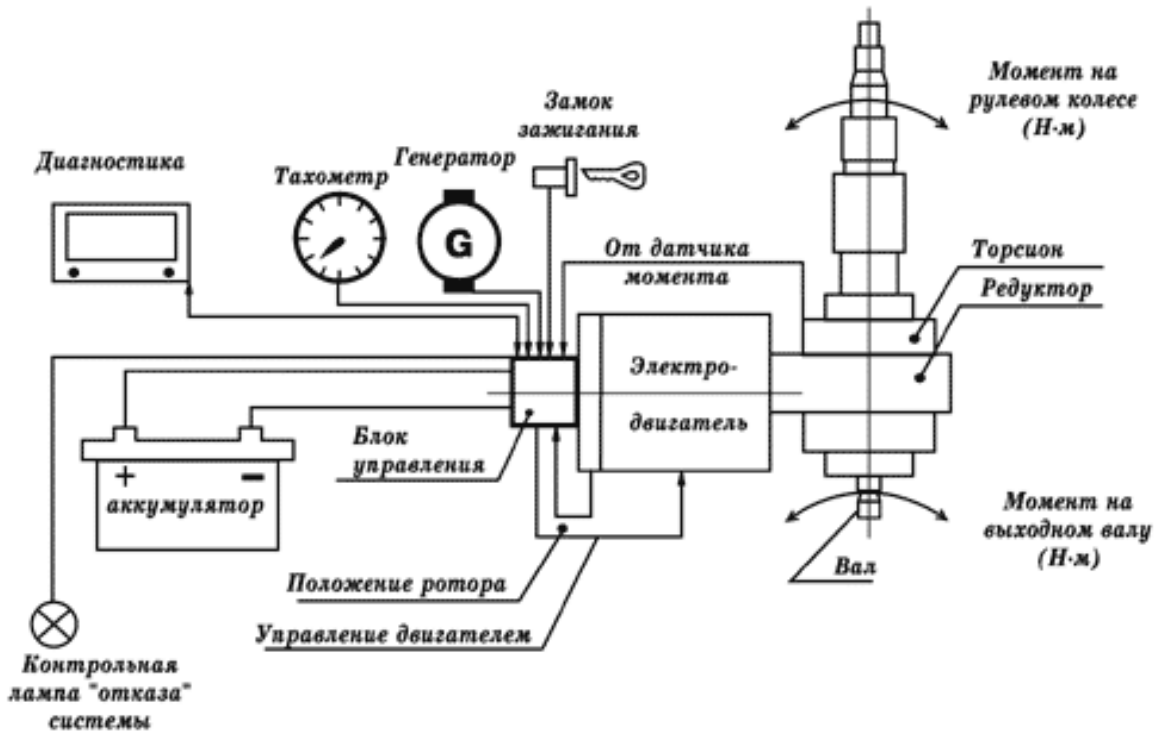


Рисунок 9 – Основные компоненты системы управления движением беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina»

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований. Представлено подробное описание объекта исследований, аппаратурно-измерительного комплекса, условий и методики проведения экспериментов. На основании сравнения полученных результатов с расчетными данными произведена оценка адекватности математической модели и определена её точность.

В качестве объекта исследований выбрано беспилотное АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina», которое разработано в ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».

Общие вид объекта и компоновка системы управления движением беспилотного АТС представлены на рисунке 10.

Рисунок 10 – Общие виды беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina»

В состав исполнительных устройств системы управления беспилотным АТС входят: рулевое управление; управление приводом дроссельной заслонки; управлением тормозной системой; управление трансмиссией.

В состав системы технического зрения включены видеокамеры, радары дальнего и ближнего действия, лазеры и GPS/Глонасс приемники. С помощью системы технического зрения обеспечивается анализ обстановки в окружающем пространстве на расстоянии до 200 м, распознавание сплошной, прерывистой, прямолинейной и криволинейной дорожной разметки, основных дорожных знаков и определение движущихся и не движущихся объектов, передвижение беспилотного АТС по заданному маршруту, прокладывание траектории движения и анализ дорожной ситуации.

Компоновка приводов системы управления беспилотным АТС представлена на рисунке 11.

Привод педали тормоза | Привод селектора переключения АККП | Привод рулевого управления

Рисунок 11 – Компоновка приводов системы управления движением беспилотного АТС в подкапотном пространстве и в салоне

При проведении испытаний использовалась система точного позиционирования Genesys ADMA-G, разработанная специально для оценки динамики движения автомобиля, на основе которой могут быть определны скорости и ускорения по трем пространственным осям, а также углы поворота относительно них.

Рисунок 12 – Состав системы Genesys ADMA-G

Система функционирует с использованием базовой станции, позволяющей значительно уменьшить погрешность GPS за счет получения

данных сразу с 13 спутников. Запись параметров происходит с привязкой ко времени и GPS координатам.

На рисунке 13 представлен внешний вид беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina» с внедренной системой ADMA-G. Система монтируется непосредственно на борту беспилотного АТС (за исключением базовой GPS станции). GPS антенна устанавливается на крышу автомобиля и в системе координат автомобиля совмещается с центром масс по осям *ox* и *oy*.

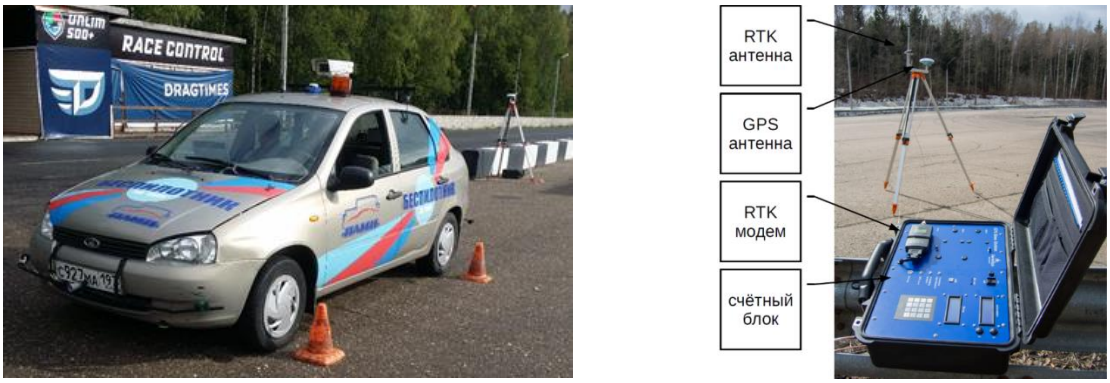


Рисунок 13 – Внешний вид беспилотного АТС на базе «LADA-Kalina» с подключенной системой ADMA-G и развернутой базовой станцией

Испытания разработанного беспилотного АТС проводились на экспериментально-исследовательской базе НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ» г. Дмитров. В качестве полигона для испытаний была выбрана динамометрическая дорога - прямолинейная, горизонтальная, проложена с севера на юг (с учетом розы ветров). По обеим сторонам дороги имеется естественная защита (лес) от бокового ветра, что крайне необходимо при измерениях. Дорога предназначается для испытания автомобилей на тягово-скоростные качества, тормозные качества, топливную экономичность, управляемость и устойчивость. Общая длина динамометрической дороги составляет 5,4 км, а длина горизонтальной части - 4,7 км.

На рисунке 14 представлены кадры положений беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina» при выполнении маневра «Переставка $S_П = 20$ м».

Рисунок 14 – Кадры положений беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina» при выполнении маневра «Переставка $S_П = 20$ м»

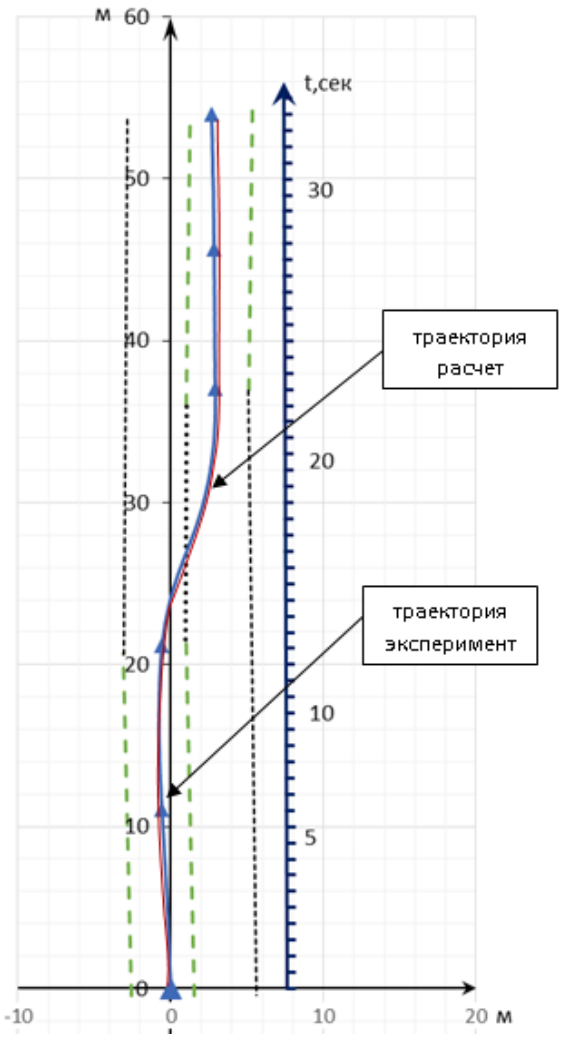


Рисунок 15 – Траектории движения, полученные по результатам экспериментальных и теоретических исследований

На рисунке 15 представлены траектории движения беспилотного АТС, полученные по результатам теоретических и экспериментальных исследований при выполнении маневра «Переставка $S_П = 20$ м».

Расхождение по основным оценочным показателям не превысило 8%.

Результаты сравнения экспериментальных и теоретических данных при выполнении маневра «Переставка $S_П = 20$ м» позволяют сделать вывод об адекватности разработанной модели криволинейного движения беспилотного АТС по ровному твердому опорному основанию и ее пригодности при прогнозировании характеристик криволинейного движения беспилотного АТС, в том числе, и на стадиях проектирования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основе современных положений теории движения автомобиля разработана математическая модель, которая позволяет прогнозировать характеристики криволинейного движения беспилотного АТС. Особенностью модели является учет временных задержек при выработке и осуществлении управляющих воздействий на траспортное средство путем моделирования работы измерительной и вычислительной аппаратуры, а также исполнительных устройств.

2. Разработанная математическая модель является основой метода выбора рациональных параметров систем управления движением беспилотного АТС на стадии проектирования при выполнении типовых маневров и при движении по заданному маршруту. Суть метода заключается в последовательной реализации различной временной задержки управляющего сигнала на исполнительное устройство, воздействующее на рулевое колесо траспортного средства, с целью определения границы безопасного выполнения маневра.

3. С помощью имитационного математического моделирования динамики беспилотного АТС при выполнении типового маневра «Переставка s=20 м» установлено:

- максимальная скорость выполнения маневра «Переставка s=20 м» на опорном основании с максимальным коэффициентом сцепления – 0,8 для беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Калина» составила 94 км/ч;

- максимальные величины временных задержек управляющего сигнала на рулевое управление, позволившие осуществлять безопасное выполнение маневра «Переставка s=20 м» на опорном основании с максимальным коэффициентом сцепления – 0,8 при различных скоростях движения составили соответственно: $V_{\max} = 94\ км/ч$ - $\Delta t = 0,02\ с$; $V_{\max} = 60\ км/ч$ - $\Delta t = 0,37\ с$; $V_{\max} = 40\ км/ч$ - $\Delta t = 0,66\ с$.

4. Получены следующие результаты при теоретических исследованиях движения беспилотного АТС по заданному маршруту в ограниченном коридоре:

- выбранная стратегия управления позволила обеспечить безопасное движение на всей протяженности трассы. Для прохождения участка трассы с поворотом 90^0 скорость беспилотного АТС должна быть снижена до 11 км/ч;

- определены максимальные величины временных задержек управляющего сигнала на рулевое управление, позволившие безопасно выполнить движение по заданному маршруту при различных скоростях движения составили соответственно: $V_{\max} = 10\ км/ч$ - $\Delta t = 0,64\ с$; $V_{\max} = 5\ км/ч$ - $\Delta t = 1,06\ с$; $V_{\max} = 2\ км/ч$ - $\Delta t = 1,47\ с$.

5. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают адекватность разработанной математической модели и ее пригодность для прогнозирования характеристик криволинейного движения беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina». Максимальное расхождение составляет не более 8%.

6. По результатам имитационного математического моделирования и экспериментальных исследований подтверждена обоснованность выбора

конструктивных решений системы управления движением беспилотного АТС на базе «LADA-Kalina».

Система управления поворотом колес включает в себя исполнительное устройство, электронный блок управления, датчик скорости движения автомобиля, датчик оборотов двигателя; индикатор неисправности системы, червячный редуктор, датчик крутящего момента, коммутационные провода. В качестве актуатора использован стандартный электрический усилитель руля, через червячную передачу воздействующий на вал рулевого привода.

Реализованная система управления движением позволяет обеспечить требования по скорости безопасного выполнения маневров.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Ендачев Д.В. Приводы управления «Беспилотными» автотранспортными средствами. / А.М. Сайкин, Д.В. Ендачев, А.В. Архипов, А.В. Панфилов // Труды НАМИ: сб. науч. Ст. – М., 2012. – Вып. № 250. – С. 96-113. **Входит в перечень ВАК.**

2. Ендачев Д.В. Современное состояние разработок по созданию «Беспилотных» автотранспортных средств за рубежом и в ФГУП «НАМИ». / А.М. Сайкин, Д.В. Ендачёв, И.В. Холодилин // Труды НАМИ: сб. науч. Ст. – М., 2012. – Вып. № 250. – С. 80-95. **Входит в перечень ВАК.**

3. Ендачев Д.В. «Беспилотные» автомобили – этапы разработки и испытаний. / А.М. Сайкин, М.В. Нагайцев, Д.В. Ендачев // Журнал ААИ. –М., 2012. – Вып. - № 5(76). - с. 32- 39. **Входит в перечень ВАК.**

4. Ендачев Д.В. Разработка схем и алгоритмов автоматических систем управления к составным частям «Беспилотного» автотранспортного средства. / А.М. Сайкин, И.А. Плиев, Д.В. Ендачёв // Труды НАМИ: сб. науч. Ст. – М., 2013. – Вып. № 254. – С. 20-46. **Входит в перечень ВАК.**

5. Ендачев Д.В. Метод обеспечения безопасности движения беспилотных автотранспортных средств на стадии проектирования. / Журнал ААИ. – М., 2016. – Вып. - № 3(98). - с. 12- 17. **Входит в перечень ВАК.**

6. Ендачев Д.В. «Беспилотный» автомобиль НАМИ. /А.М. Сайкин, Д.В. Ендачев, И.В. Холодилин // Журнал «Автомобильная промышленность». – М., 2013. - Вып.№4. – С. 8-9.

7. Ендачев Д.В. Системы управления «Беспилотных» АТС. /М.В. Нагайцев, А.М. Сайкин, И.А. Плиев, Д.В. Ендачев // Журнал «Автомобильная промышленность». – М., 2013. - Вып.№10. – С. 7-9.

8. Ендачев Д.В. «Беспилотные» АТС – на подступах к реализации. / А.М. Сайкин, Д.В. Ендачев // Журнал «Автомобильная промышленность». – М.,2013. Вып.- №3. – С. 35-38.

9. Saikin A., Bakhmutov S., Terenchenko A., Endachev D., Karpukhin K., Zarubkin V. Tendency of creation of «driverless» vehicles abroad / Bioscience Biotechnology Research Asia. 2014 - Vol. 11 (Spl. Edn.), p. 241-246.

10. Ендачев Д.В. Особенности создания перспективного экологически чистого беспилотного транспортного средства на электротяге. / Сайкин А.М., Карпухин К.Е., Переладов А.С., Ендачев Д.В., Теренченко А.С. // В сборнике 94-й МНТК ААИ: Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы. Нижний Новгород. 2016. С. 44-52.