

УДК 629.3.072+629.331

МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Д. В. Ендачѳв / ФГУП «НАМИ»

Активная разработка беспилотных автотранспортных средств (БАС) ведущими зарубежными автопроизводителями началась в восьмидесятые годы XX века. Объектами исследований данного направления являются легковые автомобили, грузовой транспорт, сельскохозяйственная техника, техника военного назначения, внутризаводской и карьерный транспорт.

В настоящее время работы по созданию БАС ведут все мировые автопроизводители, особенно в США, Германии, Японии, Италии, Китае, Великобритании, Франции и Корее (автоконцерны General Motors, Ford, Mercedes-Benz, Volkswagen, Audi, BMW, Volvo, Cadillac) [1–10]. Значительный объём работ проводится по закрытой тематике в рамках оборонного заказа, и по этой причине результаты исследований практически не публикуются в открытой печати. Сложные наукоѳмкие технические решения, программное обеспечение, датчики систем управления БАС во многих странах отнесены к продукции двойного назначения.

Основными преимуществами БАС 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 ѳффективное 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.

Анализ систем управления БАС выявил большое число проблем, возникающих перед конструкторами в процессе их разработки и при определении требований, предъявляемых к системе управления, что обусловлено следующими 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 от качества работы системы

управления напрямую зависит безопасность движения, поэтому разработчики на стадии проектирования техники обязаны определить эксплуатационный скоростной диапазон, в котором вероятность возникновения аварийной ситуации минимальна.

В этой связи задача прогнозирования характеристик криволинейного движения БАС на стадии проектирования с учётом временных задержек измерительных, вычислительных и исполнительных устройств является актуальной. Исследования систем управления движением БАС проводились с использованием численных методов моделирования движения. 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 ФГУП «НАМИ» на базе серийного автомобиля LADA Kalina.

В процессе исследования системы управления движением разработана математическая модель криволинейного движения БАС. В ней движение БАС как тѳвр-

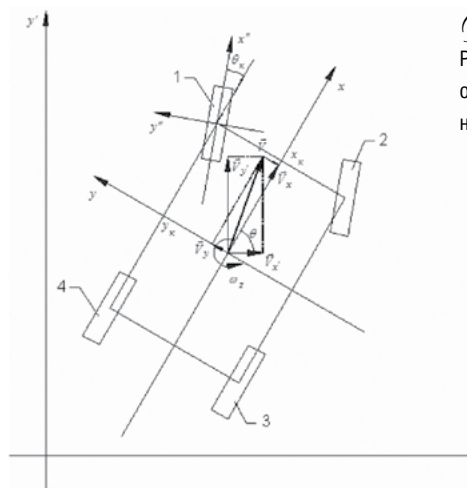


Рисунок 1.
Расѳѳтная схема
определения положения корпуса АТС

дого тела рассматривается в горизонтальной плоскости на ровной недеформируемой опорной поверхности и складывается из поступательного движения центра масс и вращательного движения вокруг центра масс (рис. 1). Система уравнений (1), описывающая данное движение, позволяет рассчитать текущие ускорения по значениям сил и моментов, действующих на транспортное средство:

$$\begin{cases} a_x = \frac{dV'_x}{dt} - \omega_z \cdot V'_y = \frac{1}{m} \cdot \left(\sum_{i=1}^4 R_{xi} - m \cdot g \cdot \sin(\alpha) - P_{wx} \right); \\ a_y = \frac{dV'_y}{dt} + \omega_z \cdot V'_x = \frac{1}{m} \cdot \left(\sum_{i=1}^4 R_{yi} - P_{wy} \right); \\ J_z \cdot \frac{d\omega_z}{dt} = \sum_{i=1}^4 M_{mzi} + \sum_{i=1}^4 M(\vec{R}_i); \\ V'_x = \frac{dx'}{dt} = V_x \cdot \cos \theta - V_y \cdot \sin \theta; \\ V'_y = \frac{dy'}{dt} = V_x \cdot \sin \theta + V_y \cdot \cos \theta; \\ \omega_z = \frac{d\theta}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где m — масса БАС; J_z — момент инерции БАС относительно оси z ; V — вектор скорости центра масс БАС; a — вектор ускорения центра масс беспилотного АТС (абсолютная производная от вектора скорости центра масс БАС); dV/dt — относительная производная от вектора скорости центра масс БАС; ω — вектор угловой скорости поворота БАС; θ — угол поворота БАС относительно оси x' ; x', y' — координаты центра масс БАС в неподвижной системе координат; $x - y$ — подвижная система координат, связанная с корпусом БАС; R_i — вектор силы взаимодействия с опорной поверхностью, действующей на i -е колесо; P_w — вектор силы сопротивления воздуха; M_{mzi} — момент сопротивления повороту i -го колеса.

Нормальные реакции R_{zi} , необходимые для определения силы R_i , находятся из решения следующей системы уравнений с учётом того, что концы их векторов лежат в одной плоскости:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 R_{zi} = m \cdot g \cdot \cos \alpha; \\ \sum_{i=1}^4 R_{xi} \cdot x_i + \sum_{i=1}^4 M_i + P_w \cdot H_x = -m \cdot H_z \cdot (g \cdot \sin \alpha + a_x); \\ \sum_{i=1}^4 R_{yi} \cdot y_i + P_w \cdot H_y = -m \cdot a_y \cdot H_z, \end{cases} \quad (2)$$

где x_i, y_i — координаты i -го колеса в подвижной системе координат $x - y$; H_z — высота центра масс БАС; H_{wx}, H_{wy} — 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.

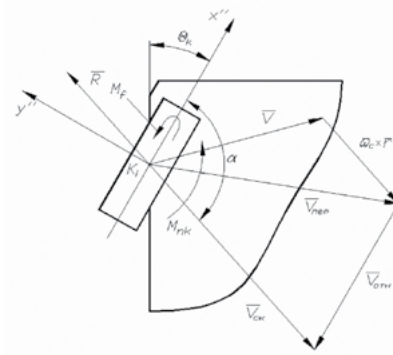


Рисунок 2.

Расчётная схема взаимодействия колеса с опорной поверхностью

Величина силы взаимодействия с опорным основанием составит

$$R = \mu_s \cdot R_{zi}, \quad (3)$$

где μ_s — коэффициент взаимодействия, являющийся функцией направления скольжения α , величины скольжения S и максимального коэффициента взаимодействия с опорным основанием μ_{smax} :

$$\mu_s = f(\mu_{smax}, \alpha, S) \quad (4)$$

Коэффициент буксования:

$$S = \frac{V_{ск}}{\omega_k \cdot r_{ko}}, \quad (5)$$

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

Вектор силы взаимодействия с опорным основанием R_i направлен противоположно вектору скорости скольжения $V_{ск}$.

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

$$M_{ji} = f \cdot R_{zi} \cdot r_{ko} \quad (6)$$

где f — коэффициент сопротивления прямолинейному движению колеса.

Трансмиссия переднеприводного БАС с симметричным дифференциалом описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} J_k \cdot \dot{\omega}_{k1} = \frac{M_{12}}{2} \cdot U_{гп} \cdot \eta_{гп} - M_1; \\ J_k \cdot \dot{\omega}_{k2} = \frac{M_{12}}{2} \cdot U_{гп} \cdot \eta_{гп} - M_2; \\ \frac{\dot{\omega}_3}{U_{гп} \cdot U_{км}} = \frac{\dot{\omega}_{k1} + \dot{\omega}_{k2}}{2}; \\ (J_\delta \cdot U_{км}^2 + J_{кпн}) \cdot \frac{\dot{\omega}_3}{U_{км}} = M_\delta \cdot U_{км} \cdot \eta_{кпн} - M_{12}, \end{cases} \quad (7)$$

где J_k — момент инерции колеса; J_δ — момент инерции двигателя; $J_{кпн}$ — момент инерции вращающихся частей коробки передач на i -й передаче; ω_{ki} — угловое ускорение i -го колеса; M_i — момент сопротивления на i -м колесе; M_{12} — момент сопротивления, приведённый к выходному валу коробки передач; ω_δ — угловое ускорение вала двигателя; M_δ — момент, развиваемый двигателем; $U_{кпн}$ — передаточное число коробки передач на i -й передаче; $U_{гпн}$ — передаточное число главной передачи; $\eta_{гпн}$ — КПД главной передачи; $\eta_{кпн}$ — КПД коробки передач.

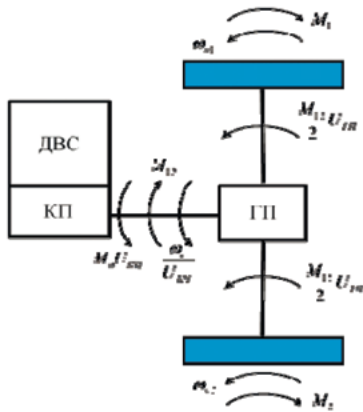


Рисунок 3. Схема трансмиссии БАС с колёсной формулой 4 × 2

$$M_i = R_{ix} \cdot r_o + M_{mi} + M_{fi}, \quad (8)$$

где M_i — тормозной момент на i -м колесе; R_{ix} — проекции вектора силы взаимодействия с грунтом на оси системы координат $x'' - y''$; r_o — расстояние от оси колеса до опорной поверхности.

Схема трансмиссии БАС с колёсной формулой 4 × 2 представлена на рис. 3.

Для БАС при определении момента сопротивления повороту M_i целесообразно воспользоваться не теорией бокового увода, а использовать следующие зависимости:

$$\begin{cases} M_{nk} = \frac{M_{nkMAX}}{1 + \frac{0,15}{k(s) \cdot B_K}}; \\ M_{nkMAX} = 0,375 \cdot \mu_{max} \cdot R_{z1} \cdot \sqrt{\frac{\pi L_K B_K}{4}}, \end{cases} \quad (9)$$

где M_{nk} — момент сопротивления повороту одиночного колеса, катящегося по дуге кривизной $k(s)$; M_{nkMAX} — максимальный момент сопротивления повороту на месте одиночного колеса; L_K, B_K — длина и ширина отпечатка шины соответственно.

Динамика рулевого колеса описывается уравнением

$$J_{ру} \cdot \ddot{\alpha} = M_{rp}, \quad (10)$$

где α — угол поворота рулевого колеса (соответственно, $\ddot{\alpha}$ — его угловое ускорение); $J_{ру}$ — момент инерции де-

талей рулевого управления, приведённый к рулевому колесу; M_{rp} — момент, приложенный со стороны электродвигателя к рулевому колесу.

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

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

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

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

$$|M_{rp}| \leq M_{эд.макс}. \quad (12)$$

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

Общий вид модели представлен на рис. 4.

В состав модели входят:

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

- блок Signal Converter, преобразующий ШИМ-сигнал в напряжение. Содержимое блока представлено на рис. 6;

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

Численное моделирование движения БАС с реализованной системой управления проводилось в пакете

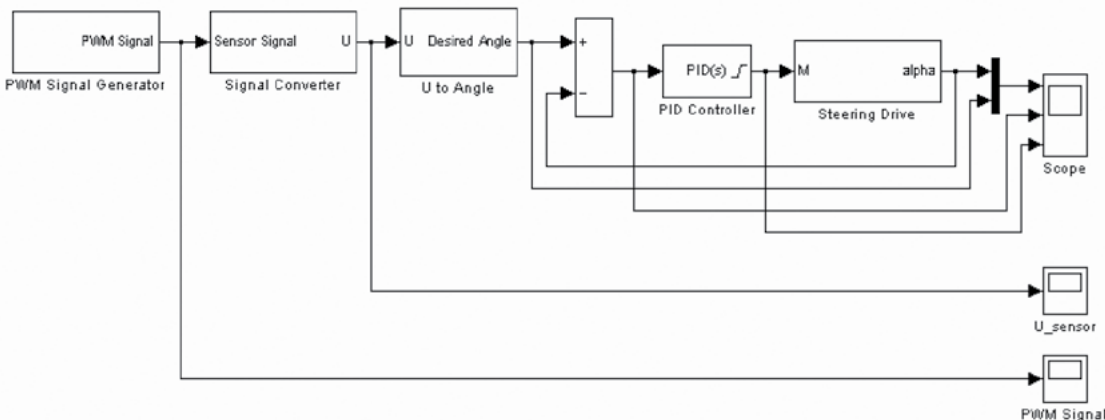


Рисунок 4. Модель системы рулевого управления БАС в ПК MATLAB/Simulink

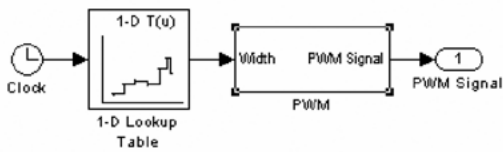


Рисунок 5. Блок PWM Signal Generator в ПК MATLAB/Simulink

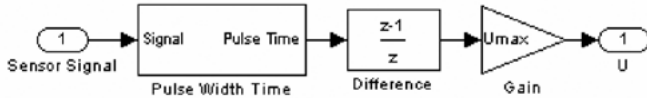


Рисунок 6. Блок Signal Converter в MATLAB/Simulink

Simulink системы MATLAB. Исследовалось движение на следующих типах опорного основания: с низкими и высокими сцепными свойствами — «лёд» ($\mu_{s\max} = 0,3$; $f = 0,02$) и «асфальт» ($\mu_{s\max} = 0,8$; $f = 0,02$).

Для оценки манёвренности, управляемости и устойчивости БАС на различных типах опорного основания разработана методика проведения имитационных испытаний. В качестве типового манёвра для исследования характеристик криволинейного движения БАС в соответствии с ГОСТ Р 52302–2004 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний» выбран манёвр «переставка $S_{II} = 20$ м».

При проведении исследований по выполнению манёвра «переставка $S_{II} = 20$ м» для БАС 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. Оценочным параметром для данного манёвра является предельно возможная скорость выполнения при заданной величине задержки управляющего воздействия.

На рис. 7 представлены траектории выполнения манёвра «переставка $S_{II} = 20$ м» при различной временной задержке управляющего воздействия.

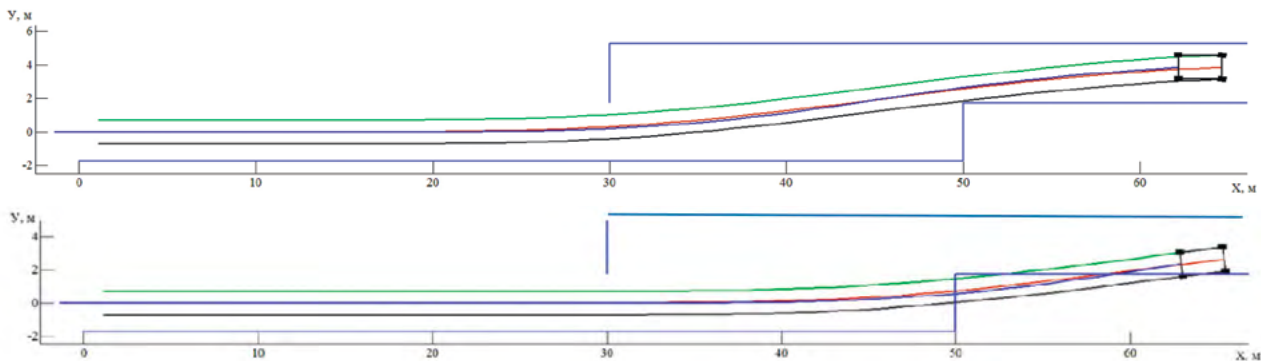


Рисунок 7. Траектория выполнения манёвра «переставка»: а — время задержки управляющего сигнала — 0 сек.; б — время задержки управляющего сигнала — 0,5 сек.

Для БАС на базе серийного автомобиля LADA Kalina определены максимальные скорости безопасного выполнения манёвра «переставка $S_{II} = 20$ м» на опорном основании «асфальт» (максимальный коэффициент сцепления — 0,8) с различным временем задержки сигнала управляющего воздействия. Результаты представлены на рис. 8.

Для исследования характеристик криволинейного движения БАС 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 перекрёстка преследует цель максимально приблизить теоретическое исследование динамики БАС к реальным условиям эксплуатации. Движение БАС осуществлялось на ровном твёрдом опорном основании «асфальт». Время задержки управляющего воздействия увеличивалось до момента выхода БАС из коридора движения, что позволило определить максимальную скорость успешного прохождения трассы без потери устойчивости и управляемости.

На рис. 9 представлена траектория движения БАС при успешном прохождении заданной трассы. Выбранная стратегия управления позволила обеспечить

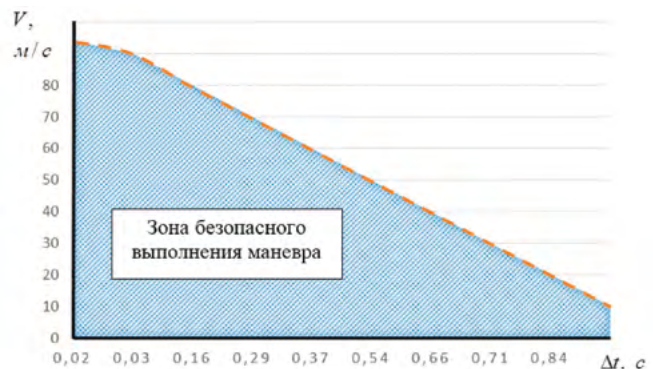


Рисунок 8. Зависимость максимальной скорости безопасного выполнения манёвра «переставка $S = 20$ м» от времени задержки сигнала управляющего воздействия Δt

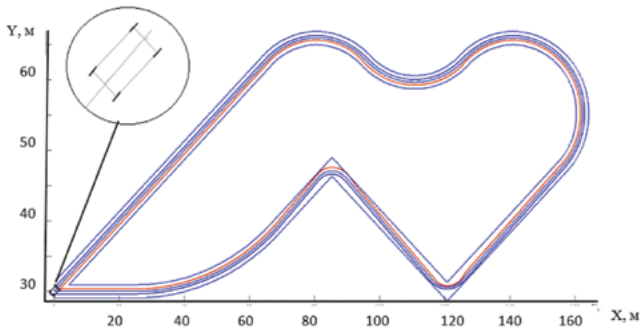


Рисунок 9. Движение БАС по заданной трассе



Рисунок 10. Внешний вид БАС на базе LADA Kalina с подключённой системой ADMA-G и развёрнутой базовой станцией

безопасное движение на всей протяжённости трассы. Для прохождения участка трассы с поворотом 90° скорость БАС должна быть снижена до 11 км/ч.

Полученные в работе результаты позволили обосновать выбор параметров системы управления движением БАС для успешного и безопасного прохождения заданного маршрута.

При проведении экспериментальных исследований в качестве объекта исследований выбрано беспилотное АТС, разработанное в ФГУП «НАМИ».

В состав исполнительных устройств системы управления БАС входят: рулевое управление, управление приводом дроссельной заслонки, управление тормозной системой, управление трансмиссией.

В состав системы технического зрения включены видеокамеры, радары дальнего и ближнего действия, лазеры и приёмники GPS/ГЛОНАСС. 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 БАС по заданному маршруту, прокладывание траектории движения и анализ дорожной ситуации.

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

Система функционирует с использованием базовой станции, позволяющей значительно уменьшить погрешность GPS за счёт получения данных сразу с тринадцати спутников. Запись параметров происходит с привязкой ко времени и GPS-координатам.

На рис. 10 представлен внешний вид БАС с системой ADMA-G. Система монтируется непосредственно на борту БАС (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 .

Испытания разработанного БАС проводились на экспериментально-исследовательской базе НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ» в Дмитрове. В качестве полигона для испытаний была выбрана динамометрическая дорога — прямолинейная, горизонтальная, проложенная с севера на юг (с учётом 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 рис. 11 представлены кадры положений БАС при выполнении манёвра «переставка $S_{II} = 20$ м».

На рис. 12 представлены траектории движения БАС, полученные по результатам теоретических и экспериментальных исследований при выполнении манёвра «переставка $S_{II} = 20$ м». Расхождение по основным оценочным показателям не превысило 8 %.

Результаты сравнения экспериментальных и теоретических данных при выполнении манёвра «переставка $S_{II} = 20$ м» позволяют сделать вывод об адекватности разработанной модели криволинейного движения БАС по ровному твёрдому опорному основанию и её пригодности для прогнозирования характеристик криволинейного движения БАС, в том числе на стадиях проектирования.

ВЫВОДЫ

Разработанный метод обеспечения безопасности движения БАС позволяет на стадии проектирования обосновать выбор рациональных конструктивных параметров систем управления движением, обеспечивающих выполнение требований по безопасности при совершении типовых манёвров на заранее выбранном маршруте. Поставленная задача решается известными методами имитационного математического моделирования, для чего разработана математическая модель динамики БАС. По результатам имитационного математического моделирования динамики БАС установлены величины максимальной скорости и временных задержек управ-



Рисунок 11. Кадры положений БАС на базе серийного автомобиля LADA Kalina при выполнении манёвра «переставка $S_{II} = 20$ м»

ляющего сигнала на рулевое управление, позволившие осуществлять безопасное выполнение манёвра «переставка $S_{II} = 20$ м» при различных скоростях движения. Проведённые экспериментальные исследования подтверждают адекватность разработанной математической модели и её пригодность для прогнозирования характеристик криволинейного движения БАС. По результатам имитационного математического моделирования и экспериментальных исследований подтверждена обоснованность выбора конструктивных решений системы управления движением БАС на базе LADA Kalina.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Google: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <http://www.google.com> (дата обращения: 31.07.2015).
2. RoboCV: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <http://robocv.ru> (дата обращения: 03.08.2015).
3. Volkswagen: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/en/innovation/driver_assistance/Temporary_Auto_Pilot.html (дата обращения: 05.08.2015).
4. Audi: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <http://www.audi.com> (дата обращения: 06.08.2015).
5. BMW: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/connecteddrive/2013/index.html> (дата обращения: 10.08.2015).
6. Cadillac: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cadillac.com> (дата обращения: 20.08.2015).
7. Volvo: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <http://www.volvocars.com/uk/top/about/news-events/pages/default.aspx> (дата обращения: 21.08.2015).
8. DARPA: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <http://www.darpa.mil> (дата обращения: 21.08.2015).
9. John Deere: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: http://www.deere.ru/ru_RU/regional_home.page (дата обращения: 05.09.2015).
10. FLANDERSMAKE: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <http://www.flandersmake.be> (дата обращения: 03.09.2015).
11. Приводы управления беспилотными автотранспортными средствами / А. М. Сайкин, Д. В. Ендачёв, А. В. Архипов, А. В. Панфилов // Труды НАМИ: сб. науч. ст. — М., 2012. — Вып. № 250. — С. 96–113.
12. Сайкин А. М. Современное состояние разработок по созданию беспилотных автотранспортных средств за рубе-

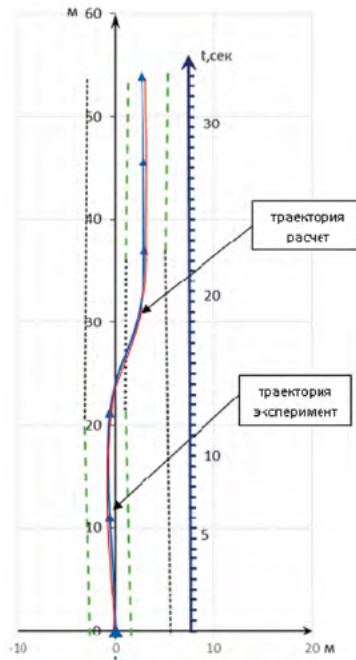


Рисунок 12. Траектории движения, полученные по результатам экспериментальных и теоретических исследований

жом 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.

13. Сайкин А. М. Беспилотные автомобили — этапы разработки и испытаний / А. М. Сайкин, М. В. Нагайцев, Д. В. Ендачёв // Журнал автомобильных инженеров. — М., 2012. — № 5 (76). — С. 32–39.
14. Сайкин А. М. 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.
15. Сайкин А. М. Беспилотный автомобиль НАМИ / А. М. Сайкин, Д. В. Ендачёв // Автомобильная промышленность. — М., 2013. — № 4. — С. 8–9.
16. Системы управления беспилотными АТС / М. В. Нагайцев, А. М. Сайкин, И. А. Плиев, Д. В. Ендачёв // Автомобильная промышленность. — М., 2013. — № 10. — С. 7–9.
17. Сайкин А. М. Беспилотные АТС — на подступах к реализации / А. М. Сайкин, Д. В. Ендачёв // Автомобильная промышленность. — М., 2013. — № 3. — С. 35–38.
18. Tendency of creation of driverless vehicles abroad / A. Saikin, S. Bakhmutov, D. Endachev et al. // Bioscience Biotechnology Research Asia. — 2014. — Vol. 11. — P. 241–246.
19. Котиев Г. О. Метод разработки ходовых систем высокоподвижных безэкипажных наземных транспортных средств / Г. О. Котиев, А. С. Дьяков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. — 2016. — Т. 174. — № 1. — С. 186–197.
20. Горелов В. А. Прогнозирование характеристик криволинейного движения автомобиля с колёсной формулой 6×6 при различных законах управления поворотом колёс задней оси / В. А. Горелов, Г. О. Котиев // Известия вузов. Машиностроение. — 2008. — № 1. — С. 44–55.