

В.Г. Михайлов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОТЛАДКИ БЕСПИЛОТНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

ОАО «Мидивисана»

Предложен новый способ отладки систем беспилотных автомобилей в лабораторных условиях на основе видеозаписи дорожной обстановки и записей сигналов датчиков беспилотного автомобиля. Метод базируется на имитационном моделировании движения, колебаний и управляемости автомобиля с использованием проектора, вибростенда и имитаторов излучателей радарных сигналов, управляемых компьютером.

Разработаны методика, схемы реализации имитационного моделирования для отладки систем управления беспилотного автомобиля и блок-схема реализации совместных моделей движения, нагруженности и управляемости автомобиля в пакете Matlab/Simulink с использованием единого массива данных профилей дороги и модуля S-Function Builder, сигналов датчиков, обменом данными по сети CAN BUS.

Ключевые слова: беспилотный автомобиль, модель, имитационное моделирование, блок-схема реализации движения, колебаний, управляемости автомобиля, продольный профиль, микропрофиль дороги, Matlab/Simulink, S-Function Builder.

Введение

В настоящее время интенсивно ведутся разработки беспилотных автомобилей и их испытания. Массовое их производство планируют начать через 10-20 лет, поскольку требуется изменение в инфраструктуре дорог, переоснащение автомобилей, удешевление системы управления. Большинство испытаний проводится с участием инженера-испытателя, контролирующего движение автомобиля (рис. 1) на случай непредвиденных ситуаций [1].



Рис. 1. Контроль движения (а), датчики и устройства беспилотного автомобиля (б)

Отработка систем управления представляет довольно сложный процесс обработки данных на компьютере беспилотного автомобиля, получаемых с множества различных устройств и выдачи сигналов на устройства управления. На данный период времени такой компьютер и его устройства сопряжения занимают более половины багажника автомобиля. Основные системы, обеспечивающими автономное передвижение, являются лидар, радары, датчик позиционирования на основе GPS или других систем, видеокamеры.

Лидар представляет лазерный дальномер, который устанавливается на крыше авто, который просматривает пространство (в радиусе до 100 м). В варианте беспилотного Яндекс Такси полученные от него данные в управляющем компьютере сравниваются с картами

Google. Это позволяет избегать аварийных ситуаций и соблюдать правила дорожного движения. Для позиционирования могут использоваться и другие системы навигации: Galileo, ГЛОНАСС. Из-за высокой стоимости лидара (до 10 000 \$) использование его на обычных автомобилях проблематично.

Радар используется для определения дальности объектов, траектории и скорости их движения. Он излучает радиоимпульсы, которые отражаются от препятствий и воспринимаются обратно антенной. Фактически радары выступают в качестве «зрения» автомобиля. Благодаря им система может мгновенно реагировать на любые изменения ситуации. Количество радаров, установленных на беспилотном автомобиле, 4-6 штук: обычно два впереди и два – сзади на бампере.

Датчик позиционирования на дороге – специальное устройство, которое определяет местоположение машины (координаты автомобиля), отслеживает его маршрут. Для этих целей используется GPS приемник или аналогичная система.

Видеокамера предназначена для реагирования на цветовые сигналы светофоров, объекты, которые приближаются на потенциально опасное расстояние путем распознавания изображений. Для распознавания используется библиотека OpenCV (Computer Vision). Обычно устанавливаются от 1 до 3 видеокамер.

Сложностью таких испытаний является непредсказуемость ситуаций в дороге. Для этого системы управления данных автомобилей делаются самообучаемыми. В идеале желательно, чтобы движущие автомобили обменивались данными. Сам процесс управления требует безопасной отладки, что можно в значительной степени осуществить в лабораторных условиях с использованием решения, рассмотренного далее.

1. Реализация имитационных испытаний беспилотных автомобилей

На автомобиле, оборудованном необходимыми датчиками и устройствами, в процессе движения проводится запись макро- и микропрофиля дорог, скорости и пути перемещения. Ведется панорамная съемка дорожной обстановки и запись сигналов радарных датчиков (синхронно с ними либо по отметкам фиксированного шага перемещений (через угол поворота колеса)). Полученные данные по первому варианту необходимо программно интерполировать для фиксированных точек дороги, например, с шагом 0,125 м. Это необходимо, чтобы дальнейшее моделирование проводилось на фиксированном значении шага пути при переменной скорости движения. Затем в лабораторных условиях осуществляется моделирование этого движения с синхронным воспроизведением визуальной обстановки и имитирующих сигналов излучателей аналогично подходам в работах [2, 3]. Управление последними осуществляется с помощью компьютеров. Все это обрабатывается компьютерной системой беспилотного автомобиля, и таким путем отрабатываются различные алгоритмы управления. Схема данного моделирования приведена на рис. 2. Для имитационного моделирования требуется задействование двух основных компьютеров и одного или двух мини-компьютеров, адаптеров и микроконтроллеров. Учитывая, что сейчас все электронное оборудование автомобиля построено на использовании CAN BUS, связь между компьютерами и системой управления целесообразно также осуществлять по этой сети. Ее применение для передачи данных с Simulink на стенды 6-DoF подробно рассмотрено ранее [2]. Привод на органы управления целесообразно осуществлять с помощью электроактуаторов; их применение на стендах рассмотрено в работах [2-4]. С помощью видеопроектора воспроизводится дорожная обстановка в пути на экране, изображение которого поворачивается вправо-влево с учетом реагирования руля и трассы движения. Это необходимо для отработки системы распознавания объектов, реализуемой с помощью библиотеки OpenCv. С помощью имитаторов излучателей подаются соответствующие отражению сигналы, которые воспринимаются системой управления беспилотного автомобиля. Близкий по сути подход применялся при ими-

тационном моделировании автомобиля [2]. Для вывода изображений разработано свое ПО, реализуемое с помощью Raspberry Pi 3/4 с использованием библиотеки OpenCV.

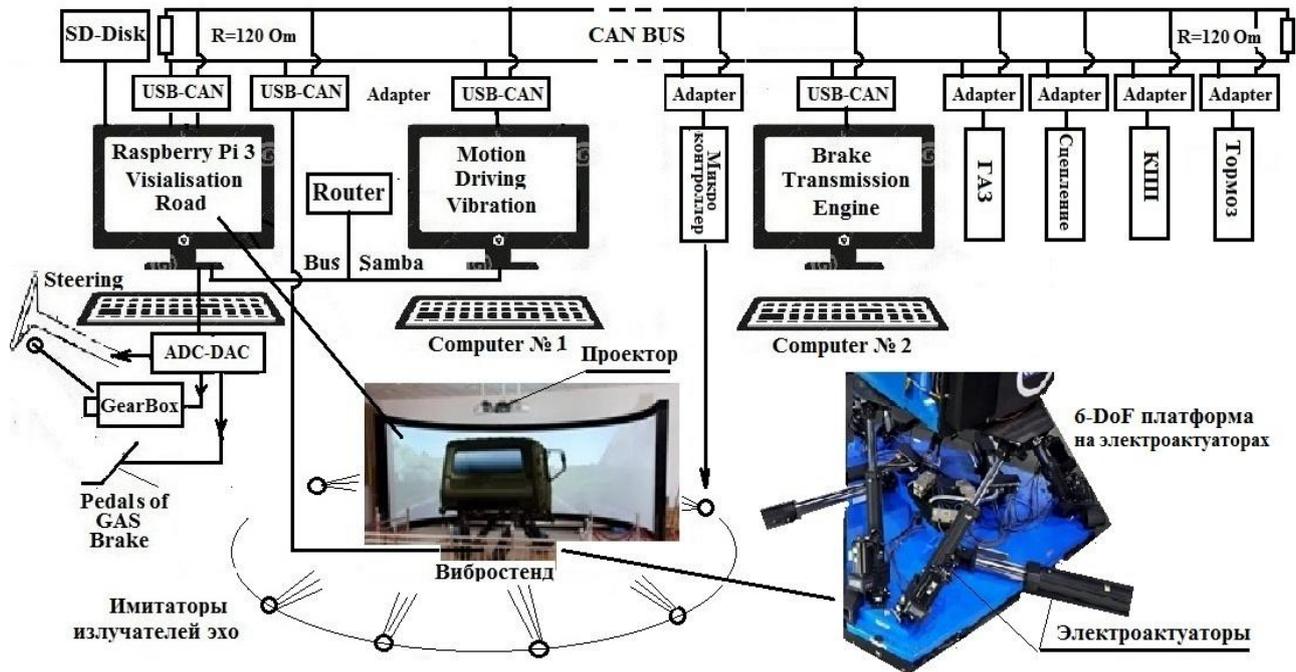


Рис. 2. Общая схема имитационного моделирования беспилотного автомобиля

Учитывая, чувствительность электроники к вибрациям, ее необходимо проверять. Помимо этого, автомобиль в движении может испытывать поперечно-угловые колебания (особенно при переезде препятствий, неровностей дороги). Поэтому необходимо контролировать реакцию системы распознавания объектов.

2. Используемые модели автомобиля

2.1. Задание внешнего возмущения. Важной частью моделирования является *задание внешнего* возмущения в виде продольного профиля и микропрофиля дороги. Для этих целей целесообразно использовать получаемый экспериментально массив этих данных с шагом замеров 0,125 м. Реализовать его воспроизведение в Simulink лучше через модуль S-Function Builder [6]. Данные этого массива должны быть связаны с массивами сигналов других датчиков. Для чего целесообразно провести одновременную запись как макро и микропрофиля дороги, позиционирования автомобиля и сигналов с датчиков. Для этого потребуются использование многоканальной регистрирующей аппаратуры с записью на компьютер, типа ZetLab.

2.2. Модель колебаний автомобиля. При имитационном моделировании беспилотных автомобилей необходимо учитывать колебания автомобиля, т.к. они влияют на сопротивление движения и динамику автомобиля из-за переменного сопротивления качения, зависящего также и от микропрофиля дороги [2]. Для этих целей целесообразно использовать более простую плоскую модель, описанную в работах [2, 7] с применением комбинированной модели трения с упругими элементами и «вязкого» трения, которая более точнее описывает динамическую характеристику подвесок и обеспечивает хорошую сходимость в октавных полосах частот (погрешность 10-15 %).

Использование пространственной модели нецелесообразно, так как она не позволяет проводить моделирование в реальном масштабе времени из-за ограниченной производительности существующих компьютеров и увеличенного в два раза числа расчетных элементов.

Судя по видео испытаний автомобилей Мерседес-Бенц [4] они не учитывают колебания автомобиля, похоже, считая это не существенным для хороших дорог. У нас же дороги значительно отличаются от зарубежных.

2.3 Управляемость и движение автомобиля. Для проведения этого требуется одновременное моделирование движения и управляемости автомобиля на основе их совместной модели, показанной на рис. 3, с учетом всех сил, действующих на автомобиль.

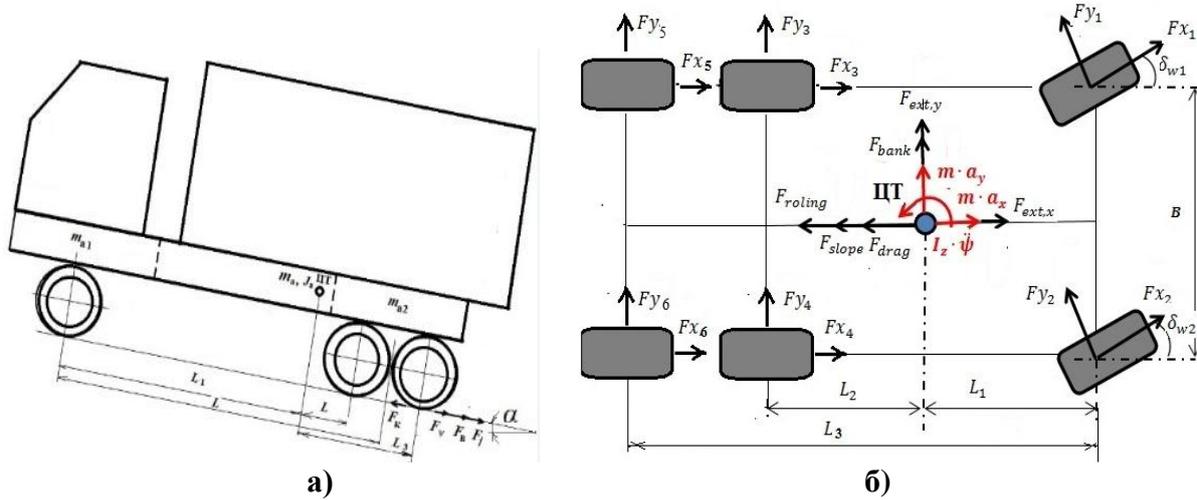


Рис. 3. Схема сил, действующих на автомобиль при движении (а) и управлении ТС (б)

Важная роль отводится модели шины (рис. 4). В вертикальной плоскости ее можно представить в виде точечного контакта как сочетание параллельного включения упругого и демпфирующего элемента. Боковой увод следует рассматривать как параллельное включение нескольких упругих элементов с ограничением их максимальных величин [2, 8, 9] и зависящем от относительной скорости, а не угла увода. Это позволяет также учитывать зависимость от частоты. В работах [8, 9] приведены графики зависимости увода и блок-схема реализации на аналоговой вычислительной машине [9], но, к сожалению, там не дано их математического описания.

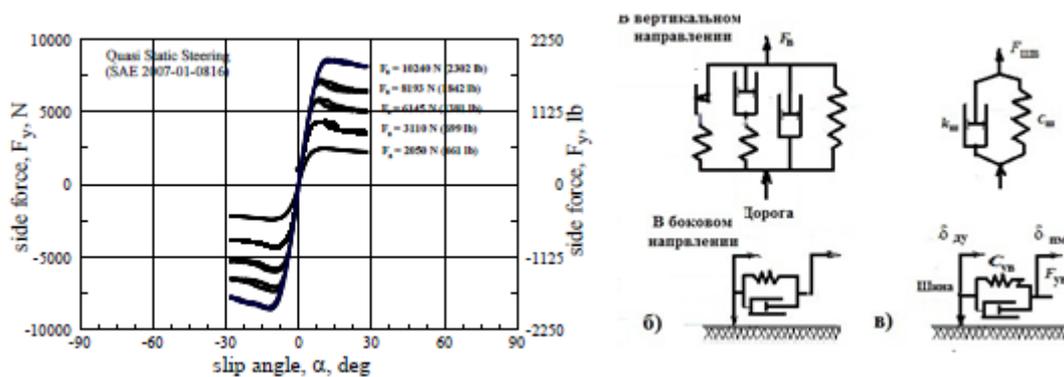


Рис. 4. Характеристика и модель увода шины

Данную модель увода шины целесообразно описать следующими уравнениями (1):

$$F_{\text{увш}} = \begin{cases} C_{\text{ш,дин1}} \int_0^t (\delta_{\text{прк}} - \delta_{\text{па}}) dt & F_{\text{тр1}} > C_{\text{ш,дин}} \int_0^t (\delta_{\text{прк}} - \delta_{\text{па}}) dt > -F_{\text{огр.усил}} \\ F_{\text{огр.усил}} & \text{если } C_{\text{ш,дин1}} \int_0^t (\delta_{\text{прк}} - \delta_{\text{па}}) dt > F_{\text{огр.усил}} \end{cases} \quad (1)$$

$$[-F_{\text{огр.усил}} \quad C_{\text{шудин}} \int_0^t (\dot{\delta}_{\text{прк}} - \dot{\delta}_{\text{па}}) dt < -F_{\text{огр.усил}};$$

Совместное движение и управляемость ТС может быть описано следующими тремя дифференциальными уравнениями с использованием второго закона Ньютона (2):

в направлении продольной оси x

$$\begin{aligned} m \cdot a_x = & F_{x1} \cdot \cos(\delta_{w1}) - F_{y1} \cdot \sin(\delta_{w1}) + F_{x2} \cdot \cos(\delta_{w2}) - F_{y2} \cdot \sin(\delta_{w2}) \\ & + F_{x3} + F_{x4} + F_{x5} + F_{x6} - F_B - F_{\vartheta}; \\ a_x = & \dot{v}_x + v_y \cdot \dot{\psi}; \\ m \cdot a_x = & 2 \cdot F_{x1} \cdot \cos(\delta_{w1}) - 2 \cdot F_{y1} \cdot \sin(\delta_{w1}) + 4 \cdot F_{x3} - F_B - F_{\vartheta}; \end{aligned} \quad (2)$$

где F_B – сила сопротивления воздуха (3).

$$F_B = K_B \cdot A_a \cdot v_a^2, \quad (3)$$

где K_B – коэффициент обтекаемости автомобиля, $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$; A_a – лобовая площадь автомобиля, м^2 , v_a – текущая скорость движения автопоезда, $\text{м}/\text{с}$, v_x – производная продольной скорости, v_y – боковая скорость; $\dot{\psi}$ – угловая скорость вращения автомобиля вокруг ЦТ.

$$F_{\vartheta} = 9,81 \cdot \vartheta \cdot m_a, \quad (4)$$

где m_a – полная масса автомобиля, кг ; ϑ – коэффициент дорожного сопротивления (5).

$$\vartheta = f_k \cdot \cos \alpha + \sin \alpha, \quad (5)$$

где α – угол наклона текущего элементарного участка маршрута, f_k – коэффициент сопротивления качению шин; F_j – инерционная сила сопротивления разгону (6),

$$F_j = m_a \cdot a \cdot \lambda, \quad (6)$$

где a – ускорение автомобиля $\text{м}/\text{с}^2$, λ – коэффициент учета вращающихся масс (7):

$$\lambda = \frac{J_{\text{eng}} \cdot \eta_r \cdot (u_{\text{кп}} \cdot u_{\text{вм}})^2}{m_a \cdot r_k^2} + \frac{\sum J_k}{m_k \cdot r_k^2}, \quad (7)$$

где J_{eng} – момент инерции вращающихся масс двигателя и сцепления, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, J_k – суммарный момент инерции колес автопоезда и приводных валов, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

в направлении поперечной оси y (8)

$$\begin{aligned} m \cdot a_y = & (F_{x1} \cdot \sin(\delta_{w1}) + F_{x2} \cdot \sin(\delta_{w2}) + F_{y1} \cdot \cos(\delta_{w1}) + F_{y1} \cdot \cos(\delta_{w2}) \\ & + F_{x2} \cdot \sin(\delta_{w2}) + F_{x2} \cdot \sin(\delta_{w2}) + F_{y2} \cdot \cos(\delta_{w2}) + F_{y2} \cdot \cos(\delta_{w2}) + F_{gr}); \\ F_{gr} = & -m \cdot g \cdot \sin(\theta) \\ m \cdot a_y = & (2 \cdot F_{x1} \cdot \sin(\delta_{w1}) + 2 \cdot F_{y1} \cdot \cos(\delta_{w1}) + F_{gr}); \\ a_y = & \dot{v}_y + v_x \cdot \dot{\psi}, \end{aligned} \quad (8)$$

где θ – угол поперечного наклона дороги, \dot{v}_y – производная продольной скорости, v_x – боковая скорость; $F_{xi} \dots F_{xi}$ – усилия на колесах.

Вращение автомобиля относительно оси Z вокруг ЦТ

$$J_a \cdot \ddot{\psi} = [-F_{x1} \cdot \cos(\delta_{w1}) - F_{y1} \cdot \sin(\delta_{w1}) - F_{x2} \cdot \cos(\delta_{w2}) - F_{y2} \cdot \sin(\delta_{w2}) - F_{x3} + F_{x4} - F_{x5} + F_{x6}] \cdot \frac{B}{2}$$

При равенстве сил $F_{x1} = F_{x2}$, $F_{y1} = F_{y2}$, $F_{x3} = F_{x4} = F_{x5} = F_{x6}$.

$$J_a \cdot \ddot{\psi} = [-2 \cdot F_{x1} \cdot \cos(\delta_{w1}) - 2 \cdot F_{y1} \cdot \sin(\delta_{w1})] \cdot \frac{B}{2}.$$

Значение для \sin углов δ_{w1}, δ_{w2} целесообразно заменить на δ_{wi} (в радианах), чтобы учесть изменение знака величины. И принять углы $\delta_{w3} \dots \delta_{w6} = 0$. Значение $\cos(\delta_{w1..2})$ меняются в пределах $1 \dots 0,94$ при $0 \dots 10^\circ$. Их также можно заменить на 1, включая $\cos(\delta_{w3..6}) = 1$.

Как видно из уравнений, для их решения требуется определить усилия на колесах с учетом углов поворота передних колес. Они могут быть определены, исходя из тяговой динамики автомобиля, описываемой известным дифференциальным уравнением второго порядка [8] (9):

$$\frac{dV_a}{dt} = \frac{dv_x}{dt} = \frac{\sum_0^6 F_k - F_b - F_g}{m_a \cdot \delta}, \quad (9)$$

где F_k – сила тяги с учетом угла поворота управляемых колес и распределения массы на них;

$F_{xi} = K_1 \cdot F_k \cdot \delta$; для 1-го, 2-го колеса, $F_{yi} = K_2 \cdot F_k$ – для 3-го... 6-го колеса (10):

$$F_k = \frac{M \cdot u_{кп} \cdot u_{вм} \cdot \eta_T}{r_k}, \quad (10)$$

K_1 – коэффициент распределения массы на переднюю ось; K_2 – коэффициент распределения массы на ведомые оси; M – текущий крутящих моментов двигателя внутреннего сгорания (ДВС), Н·м, η_T – КПД трансмиссии на соответствующей передаче КП; r_k – радиус качения ведущих колес автомобиля, м; $u_{кп}$ – текущее значение передаточного числа КПП; $u_{вм}$ – передаточное число главной передачи ведущего моста; v_a – текущая скорость движения автомобиля, м/с (11):

$$v_a = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{n \cdot r_k}{u_{кп} \cdot u_{вм}}, \quad (11)$$

где n – текущая частота вращения коленчатого вала ДВС, мин^{-1} .

Логика переключения передач КПП может быть реализована двумя способами. Первый – на основе заданного определенного нижнего и верхнего значения оборотов двигателя с учетом ускорений автомобиля/момента двигателя. Второй – инверсированных зависимостей загрузки двигателя, предложенных в работе [8]. И в том, и в другом способе логику переключения целесообразно осуществлять через модуль S-Function Builder. Переход на новую передачу осуществляется с задержкой $t=2$ с через нейтральную, при которой $F_k=0$.

Для реализации моделирования движения, колебаний и управляемости беспилотного автомобиля можно использовать блок-схему, апробированную в работе [2], приведенную на рис. 5. Она позволяет при использовании 6-ти ядерного компьютера и твердотельного накопителя (AMD Ryzen 5 2600, 6-ти ядерный 3,4/4 ГГц, RAM 16 Гб DDR-4 2666 МГц, накопитель M2. SSD 2500 Мб/с, MB ASUS PRIME B450 PLUS, $t=0,0001$ с) с передачей данных в асинхронном режиме по CAN BUS реализовать режим реального времени. На основе данного моделирования можно проводить анализ реагирования системы управления. Но для этого через S-Function Builder, сеть CAN BUS необходимо подключить систему управления беспилотного автомобиля с его датчиками, что возможно только в условиях большого коллектива. Дополнительно следует отметить, что CAN BUS значительно снижает быстродействие моделирования (в 4 раза), хотя она является наиболее быстродействующим (1-3 Мб/с) по сравнению передачами по RS-485 (128 кб/с) и сокетах TCP (256 кб/с). CAN BUS широко используется для передачи данных на стенды [4, 5], а также для управления станками, роботами в промышленности.

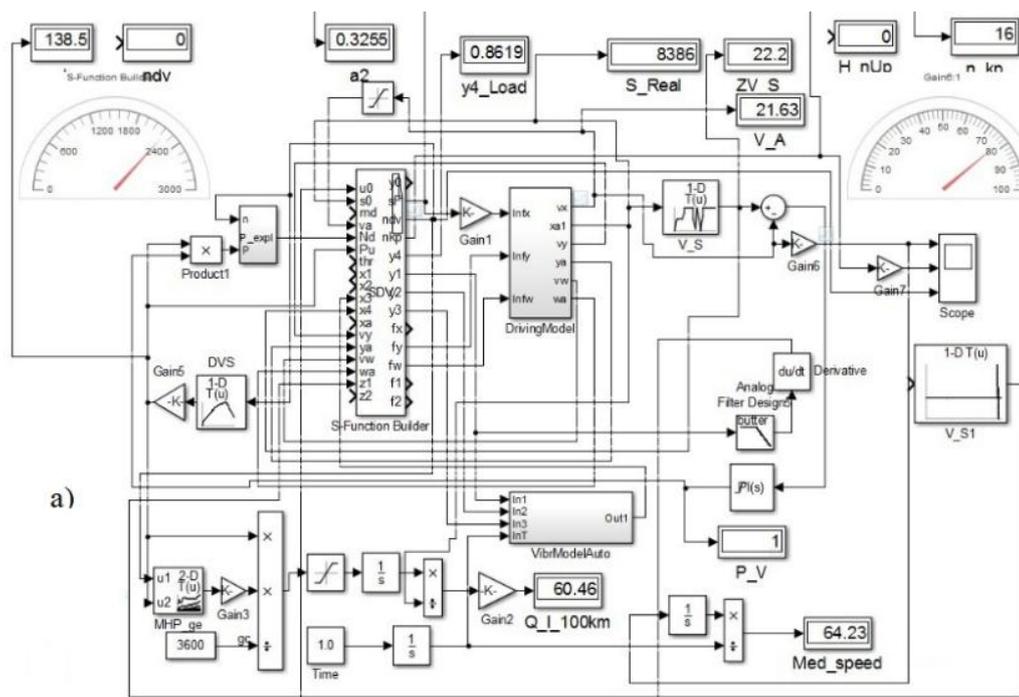


Рис. 5. Блок-схема реализации моделирования движения, колебаний и управляемости беспилотного автомобиля

Выводы

1. Предложен новый способ отладки систем беспилотных автомобилей в лабораторных условиях на основе видеозаписи дорожной обстановки, записей сигналов датчиков беспилотного автомобиля и воспроизведения их через имитаторы, базирующийся на совместном имитационном моделировании движения, колебаний и управляемости автомобиля с использованием проектора, вибростенда и имитаторов сигналов.

2. Представлены модели, методика, схемы реализации имитационного моделирования для отладки систем управления беспилотного автомобиля и блок-схемы реализации модели движения, нагруженности и управляемости автомобиля в пакете Matlab/Simulink с использованием единого массива данных профилей дороги, сигналов датчиков, и модуля S-Function Builder, обменом данными по сети CAN BUS.

Библиографический список

1. Как работает беспилотный автомобиль / <https://bespilot.com/chastye-voprosy/kak-rabotaet-bespilotnyj-avtomobil/> [Электронный ресурс]. – Режим доступа/Access mode: 28.05.2020.
2. Михайлов, В.Г. Компьютерное и имитационное моделирование автомобиля / В.Г. Михайлов, Издательский дом «Беларуская навука», 2020. – 316 с.
3. Михайлов, В.Г. Совместное моделирование движения и нагруженности автомобиля / В.Г. Михайлов // Автомобильная промышленность. – 2019. – № 7. – С.1-6.
4. The Mercedes Benz Simulator Driving Center [Электронный ресурс] / <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/innovation/the-mercedes-benz-driving-simulation-center/>. – Режим доступа: 24.12.2018.
5. Electric Simulation Table / <https://www.moog.com/products/simulation-tables/electric-simulation-table.html> [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 08.09.2019.
6. Использование S-Function Builder в Matlab/Simulink / Системный анализ и прикладная информатика. – 2018. – № 4. – С.57-64.
7. Михайлов, В.Г. Получение и использование единого массива продольного профиля и микропрофиля дороги для моделирования ТС / В.Г. Михайлов // Журнал автомобильных инженеров. – № 2. – 2018. – С.4-7.

8. **Выгонный, А.Г.** Закон переключения передач, оптимальный по тягово-скоростным и топливно-экономическим показателям магистрального автопоезда / А.Г. Выгонный, О.С. Руктешель, Р.Э. Шейбак// Актуальные вопросы машиностроения. – 2015. – Т. 4. – С. 182-188.
9. **Хачатуров, А.А.** Динамика системы дорога–шина–автомобиль–водитель / под ред. Хачатурова А.А. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
10. **Расејка, Hans В.** Tyre and vehicle dynamics, 3rd Edition / Hans В. Расејка. – Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2012.

*Дата поступления
в редакцию: 03.06.2020*

V.G. Mikhailov

USE OF IMITATING MODELING FOR DEBUGGING SELF-DRIVING CARS

JSC «Midivisana» (Minsk)

Purpose: The new way of debugging of systems of self-driving cars in vitro on the basis of video of road situation, records of signals of sensors of the self-driving car which is based on imitating modeling of the movement, fluctuations and controllability of the car with use of projector and the simulator is offered.

Findings: Technique, schemes of implementation of imitating modeling are developed for debugging of control systems of the self-driving car and the flowchart of implementation of model of the movement, loading and controllability of the car in Matlab/Simulink package of use of uniform data array of profiles of the road and the S-Function Builder module, signals of sensors, data exchange on CAN BUS network.

Key words: Self-driving car, model, imitating modeling, simulator, flowchart of implementation of the movement, fluctuations, controllability of the car, long edged profile, microprofile of the road, Matlab/Simulink, S-Function Builder.