

УДК 629.113.073

В. Г. МИХАЙЛОВ

## О НЕКОТОРЫХ ПОДХОДАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЯ НА СИМУЛЯТОРАХ

Целью данной работы является рассмотрение и отработка подходов, методики, схем реализации моделирования автомобиля на симуляторах на основе выбора более совершенных моделей движения, колебаний, управляемости автомобиля в пакете Matlab/Simulink для получения и оценки параметров автомобиля, его нагруженности. Рассмотрены особенности имитационного моделирования автомобиля на симуляторе, требования к нему, существующие методы такого моделирования на основе компьютерных моделей, гидропульсаторов и движущейся платформы с мониторами/проекторами, имитирующей дорожную обстановку, где учитываются реакции на нее водителя, существенно влияющие на режимы движения и нагруженность автомобиля с дальнейшим использованием полученных данных при стендовых испытаниях. Разработаны математические модели шины, движения, колебаний, управляемости автомобиля, обеспечивающие более корректное моделирование в реальном масштабе времени.

Предложены новые подходы и методика в реализации имитационного моделирования движения, управляемости и нагруженности автомобиля, базирующиеся на комбинированном использовании мощного компьютера и мини-компьютера Raspberry для считывания параметров органов управления, управления визуализацией дорожной обстановки, модуля S-Function Builder, созданного ПО на C/C++ и объединенного массива макро и микропрофиля реальной дороги, организации обмена информацией через три общих файла на SD диске Raspberry с определенной периодичностью (5 Гц), разработана блок-схема в Matlab/Simulink и ПО. Проведенным моделированием автомобиля 6х6 с  $m_d = 21200$  кг установлено, что он имеет расход топлива 63,56 л/100 км, среднюю скорость 66,1 км/ч и число переключений КПП 7 (при  $t > 10$  с). Причем в основном переключение КПП происходит на 3-х последних высших передачах.

**Ключевые слова:** автомобиль, математическая модель, имитационное моделирование, симулятор, блок-схема реализации, движение, нагруженность, управляемость, продольный профиль, микропрофиль дороги, Matlab/Simulink, S-Function Builder.

### Введение

Сейчас за рубежом крупные автомобильные фирмы перешли от методов компьютерного моделирования на методы имитационного моделирования на симуляторах на основе компьютерных моделей, гидропульсаторов и движущейся платформы с мониторами/проекторами, имитирующей дорожную обстановку, где учитываются реакции на нее водителя (рис. 1), существенно влияющие на режимы движения и нагруженность автомобиля с дальнейшим ис-

пользованием полученных данных при стендовых испытаниях [1, 2].

Это позволяет проработать на моделях большое количество дорожных ситуаций и вариантов конструкции и испытать их в стендовых условиях, отработать эргономику, значительно сократить время создания новых моделей машин, не подвергая риску водителей и испытателей.

Особенностью таких испытаний является проведение компьютерного моделирования в ре-



Рис. 1. Имитационные испытания автомобилей за рубежом

альном масштабе времени. Визуализация дорожной обстановки обычно осуществляется на основе компьютерной анимации, требующей больших затрат на ее создание и доступно только крупным фирмам. Подобные испытания больше проводятся для отработки систем безопасности: рулевого управления, тормозных систем в экстремальных условиях и решения задач эргономики, а также используются для отладки систем управления беспилотными автомобилями и для моделирования движения и нагруженности автомобиля.

В СНГ подобных систем нет из-за больших затрат на их создание.

Для имитационного моделирования в основном используется пакет Matlab/Simulink, обладающий большими возможностями решения нестандартных ситуаций и задания внешнего возмущения.

В работах ведущей шведской расчетной компании NIRA Dynamics AB выполняющих заказы крупных автопроизводителей и являющейся крупным центром обучения [2], а также преподавателей, аспирантов, выпускников ВУЗов, прошедших стажировку на зарубежных фирмах используются известные линейные модели колебаний и управляемости автомобиля [2, 5] аналогичные применяемым в СНГ. Последние приводят к значительному расхождению по колебаниям с экспериментом (до 50–100%).

При имитационном моделировании необходимо использование более совершенных моделей, обеспечивающих погрешность 10–15% с учетом спектра на реальной дороге.

Целью данной работы является рассмотрение и отработка подходов, методики, схем реализации моделирования автомобиля на симуляторе на основе выбора более совершенных моделей движения, колебаний, управляемости автомобиля в пакете Matlab/Simulink для получения и оценки параметров автомобиля, его нагруженности.

### 1. Задание внешнего возмущения

Для имитационного моделирования использовался полученный экспериментально массив данных продольного и микропрофиля дороги (96000 точек) [6]. Реализация возмущения с шагом 0,125 м осуществлена с использованием модуля S-Function Builder, позволяю-

щего создать пользовательскую программу на языке C/C++.

## 2. Реализация моделирования колебаний автомобиля

Для моделирования колебаний автомобиля использовалась плоская модель, описанная в работе [7] с применением комбинированной модели трения с упругими элементами и «вязкого» трения, которая более точно описывает динамическую характеристику подвесок и обеспечивает хорошую сходимость в октавных полосах частот (погрешность 10–15%).

### 3. Управляемость и движение автомобиля

Исходя из анализа работ [4, 5] использовалась модель шины в виде точечного контакта, как сочетание параллельного включения упругого и демпфирующего элемента в вертикальной плоскости. Боковой увод рассматривался как параллельное включение нескольких упругих элементов с ограничением их максимальных величин [4]. Его можно описать следующими уравнениями,

$$F_{увш} = \begin{cases} C_{уш.дин1} \int_0^t (\dot{\delta}_{прк} - \dot{\delta}_{па}) dt & F_{тр1} > \\ > C_{уш.дин1} \int_0^t (\dot{\delta}_{прк} - \dot{\delta}_{па}) dt > -F_{огр.усил} \\ F_{огр.усил} & \text{если } C_{уш.дин1} \int_0^t (\dot{\delta}_{прк} - \dot{\delta}_{па}) dt > F_{огр.усил} \\ -F_{огр.усил} & C_{уш.дин1} \int_0^t (\dot{\delta}_{прк} - \dot{\delta}_{па}) dt < -F_{огр.усил} \end{cases}$$

При моделировании использована следующая схема сил, действующих на автомобиль бхб при движении и управлении ТС (рис. 2).

На основании второго закона Ньютона движение и управляемость ТС может быть описана следующими тремя дифференциальными уравнениями:

**в направлении продольной оси x**

$$m a_x = F_{x1} \cos(\delta_{w1}) - F_{y1} \sin(\delta_{w1}) + F_{x2} \cos(\delta_{w2}) - F_{y2} \sin(\delta_{w2}) + F_{x3} + F_{x4} + F_{x5} + F_{x6} - F_B - F_9;$$

$$a_x = \dot{v}_x + v_y \dot{\psi};$$

$$m a_x = 2F_{x1} \cos(\delta_{w1}) - 2F_{y1} \sin(\delta_{w1}) + 4F_{x3} - F_B - F_9;$$

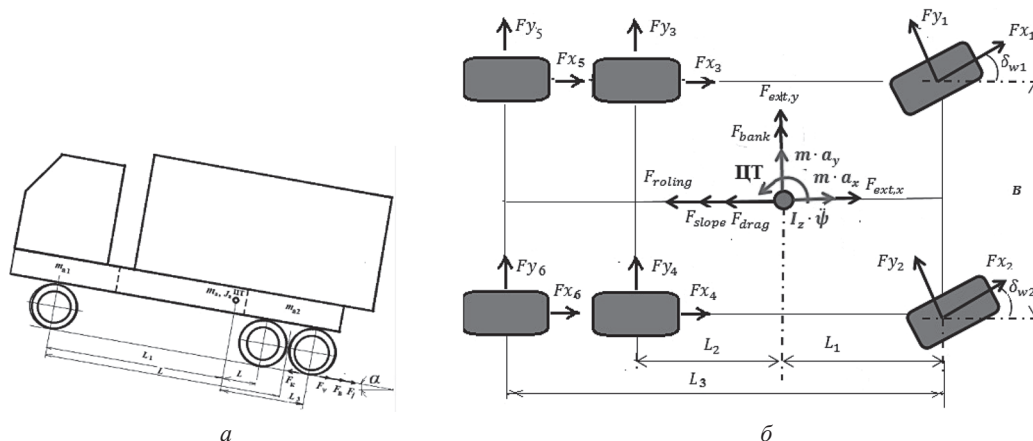


Рис. 2. Схема сил, действующих на автомобиль при движении (а) и управлении ТС (б)

где  $F_B$  – сила сопротивления воздуха  $F_B = K_B A_a v_a^2$ ;  $K_B$  – коэффициент обтекаемости автомобиля,  $\text{H c}^2/\text{M}^4$ ;  $A_a$  – лобовая площадь автомобиля,  $\text{M}^2$ ;  $v_a$  – текущая скорость движения автопоезда,  $\text{M/c}$ ;  $v_x$  – производная продольной скорости,  $v_y$  – боковая скорость;  $\dot{\psi}$  – угловая скорость вращения автомобиля вокруг ЦТ;  $F_g$  – сила дорожного сопротивления  $F_g = 9,819 m_a$ ;  $m_a$  – полная масса автомобиля,  $\text{кг}$ ;  $\vartheta$  – коэффициент дорожного сопротивления,

$$\vartheta = f_k \cos \alpha + \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол наклона текущего элементарного участка маршрута,  $f_k$  – коэффициент сопротивления качению шин;  $F_j$  – инерционная сила сопротивления разгону,

$$F_j = m_a a \gamma,$$

где  $a$  – ускорение автомобиля  $\text{M/c}^2$ .

$$\lambda = \frac{J_{eng} \eta_T (u_{кп} u_{вм})^2}{m_a r_k^2} + \frac{\sum J_k}{m_k r_k^2};$$

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

**в направлении поперечной оси y**

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

где  $\Theta$  – 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**

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

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

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

Значение для  $\sin$  углов  $\delta_{w1}, \delta_{w2}$  целесообразно заменить на  $\delta_{wi}$  (в радианах), чтобы учесть изменение знака величины. И принять углы  $\delta_{w3} \dots \delta_{w6} = 0$ . Значение  $\cos(\delta_{w1..2})$  меняются в пределах 1–0,94 при 0–10°. 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 [5]

$$\frac{dV_a}{dt} = \frac{dv_x}{dt} = \frac{\sum_0^6 F_k - F_B - F_g}{m_a \delta},$$

где  $F_k$  – сила тяги с учетом угла поворота управляемых колес и распределения массы на них;  $F_{xi} = K_1 F_k \delta$ ; для 1-го, 2-го колеса,  $F_{yi} = K_2 F_k$  – для 3–6-го колеса

$$F_k = \frac{M u_{кп} u_{вм} \eta_T}{r_k};$$

где  $K_1$  – коэффициент распределения массы на переднюю ось;  $K_2$  – коэффициент распределе-

ния массы на ведомые оси;  $M$  – текущий крутящих моментов двигателя внутреннего сгорания (ДВС), Н·м,  $\eta_T$  – 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,

$$v_a = \frac{\pi}{30} \frac{nr_k}{u_{кп}u_{вм}};$$

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

Логика переключения передач КПП реализована на основе инверсированных зависимостей загрузки двигателя, предложенных в работе [5] с помощью модуля S-Function Builder. Переход на новую передачу осуществляется с задержкой  $t = 2$  с через нейтральную, при которой  $F_k = 0$ .

### 5. Реализации имитационного моделирования автомобиля на симуляторе

Наиболее идеальным вариантом было бы использование схемы на рис. 1. Но она требует больших затрат. Поэтому для реализации моделирования движения и управляемости автомобиля на симуляторе разработана и использована более простая схема, представленная на рис. 3, которую в дальнейшем предполагается поэтапно усложнить.

Разработанная методика заключалась в одновременном проведении имитационного моделирования на двух компьютерах: с помощью мини-компьютера Raspberry Pi 3 B+ с платой АЦП\_ЦАП ADS1256\_DAC8532 и 2-х ядерно-

го основного компьютера с разделением задач. Миникомпьютер Raspberry Pi 3 использовался для визуализации дорожной обстановки (воспроизведения видеозаписи дороги) пропорциональной скорости движения и получения управляющих сигналов от педали газа, КПП и рулевого колеса. Визуализация дорожной обстановки в Raspberry Pi 3 осуществлялась с помощью разработанной программы на языке C/C++ (компилятор GCC 8.2) и библиотеки OpenCv версии 4.0.1. Обмен информации между компьютерами осуществлялся по сети с использованием файлового сервера Samba через три бинарных файла на общем (share) SD-диске Raspberry с определенной периодичностью (5 Гц) на основе счетчиков циклов, чтобы не снижать быстродействие системы. Новизной предложенного подхода является использование разработанной программы на C/C++ в модуле S-Function Builder для задания и воспроизведения массива продольного профиля и микропрофиля дороги (96000 точек), поворотов, дорожных условий, реализации многопараметрических зависимостей двигателя, учета передаточных чисел трансмиссии, нелинейных характеристик двигателя, логики переключения передач и обмена информацией, а также использование созданного ПО в Raspberry для просмотра реальной видеозаписи дорожной ситуации с переменной частотой просмотра, а не анимации [1, 2], требующей больших затрат при ее создании и соответствующего программного обеспечения..

Для макетного образца симулятора использовались руль и педаль газа от игровой приставки типа xbox 360 PS2, имеющие потенциометрические датчики (5,6 кОм), которые запи-

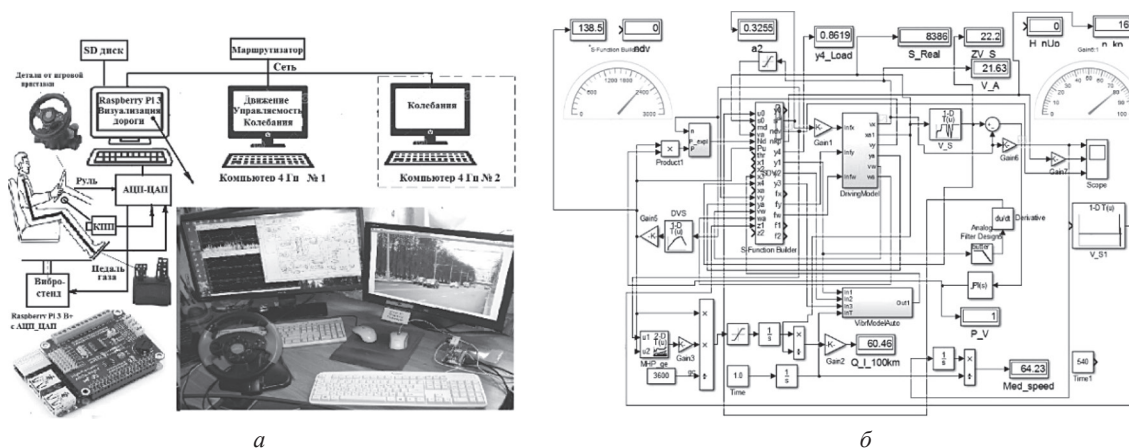


Рис. 3. Общая схема (а) и блок-схема на Simulink (б) реализации имитационного моделирования автомобиля



таны напряжением 5 В. Сигналы напряжений с датчиков подаются на Raspberry Pi 3 через АЦП платы расширения High-Precision AD/DA Board.

## 6. Полученные предварительные результаты

Исследование проводилось с использованием данных реальной местной дороге под Минском: Белробот–Приморье–Семков городок–Чучаны–МКАД2 общей протяженностью 10 км (4 км асфальтобетонного разбитого шоссе, 6 км асфальтированного шоссе хорошего качества) [8], характеристик двигателя ЯМЗ-7511 (240 кВт) для автомобиля 6х6 ( $m_a = 21200$  кг) и КПП ЯМЗ-202 (8-ми ступенчатой)  $i = 8,73; 6,13; 4,51; 3,50; 2,78; 1,75; 1,00; 0,795$  ( $i_{г.л.пер.} = 6,59$ ), радиус качения ведущего колеса  $r_k = 0,522$  м, время переключения передачи  $t = 2,0$  с. На данном этапе траектория движения была задана в модулях yvd\_S1, yvd\_S2.

Результаты моделирования приведены на рис. 4. На данном участке дороги получены следующие результаты: расход топлива 63,56 л/100 км, средняя скорость 66,1 км/ч и число переключений КПП (при  $t > 10$  с) 7. Причем в основном переключение КПП происходит на 3-х последних высших передачах. Несколько повышенный расход топлива обуславливается повышенной мощностью (240 кВт) для данного автомобиля и его массы, работой двигателя

при неполной загрузке и более высоких оборотах из-за задаваемого режима высоких скоростей движения.

Проведенные исследования при скорости  $v_a = 60\text{--}75$  км/ч показали, что в этом случае можно обойтись линейной зависимостью характеристики увода. И аналогичное наблюдается при повороте при снижении  $v_a$  до 25 км/ч.

Анализ показывает, что в дальнейшем целесообразно использовать проектор с экраном вместо монитора, поворачивающего изображение на экране и имитирующего траекторию дороги как это делается за рубежом.

Использование предложенной системы моделирования позволяет на стадии проектирования определить режимы движения и нагрузки автомобиля, отработать его эргономику, оценить его параметры, влияние параметров трансмиссии на динамику, экономичность и использовать полученные данные при испытаниях на стенде.

Создание целесообразно проводить поэтапно. На первом этапе создание макетного настольного образца с рулем, педалями, управлением КПП, визуализацией, где осуществляется отработка программного обеспечения. Вторым этапом создание простого имитационного стенда на основе гидропульсаторов. А на третьем этапе движущейся платформы с кабиной. Но это по плечу только ведущим отечественным автомобилестроительным фирмам (МАЗ,

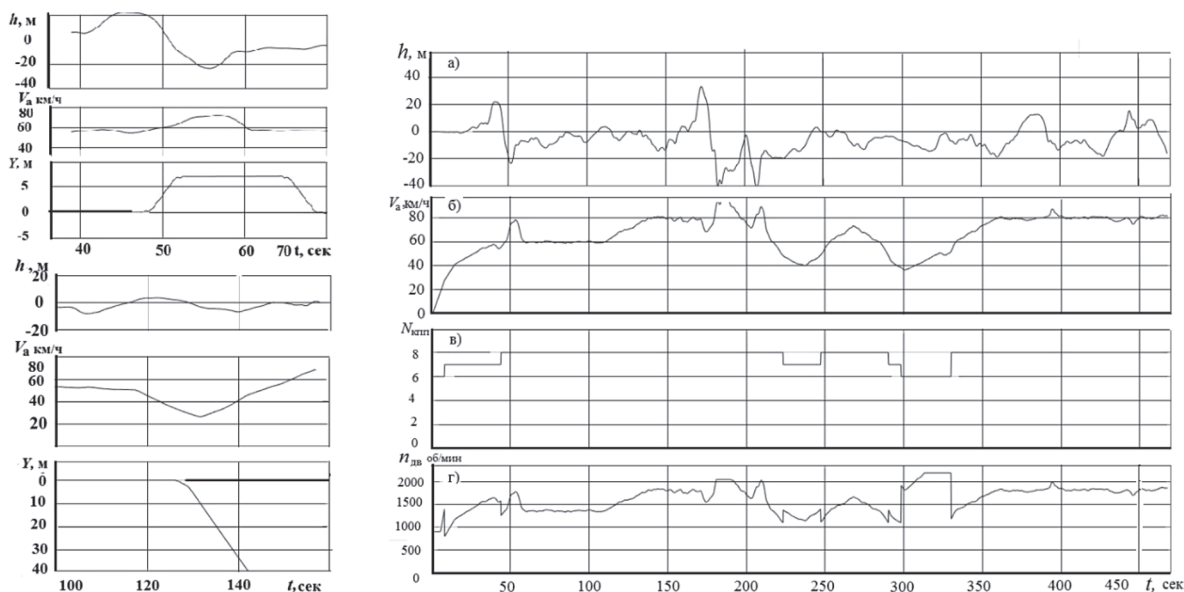


Рис. 4. Траектория перемещения ЦТ автомобиля по оси  $Y$  при выполнении маневров «переставка» (а), «поворот» (б) в зависимости от скорости и времени, профиль дороги по высоте (в), скорость движения (г), переключение передач КПП (д), обороты двигателя (е)

МЗКТ, ГАЗ, ВАЗ), имеющие гидропульсаторы Schenk или подобные им.

### Заключение

1. Рассмотрены особенности имитационного моделирования автомобиля на симуляторе, требования к нему, предложены математические модели шины, движения, колебаний, управляемости автомобиля, обеспечивающие более корректное моделирование в реальном масштабе времени.

2. Предложены новые подходы и методика в реализации имитационного моделирования движения, управляемости и нагруженности автомобиля, базирующиеся на комбинированном использовании мощного компьютера и мини-компьютера Raspberry для считывания параме-

тров органов управления, управления визуализацией и модуля S-Function Builder, созданного ПО на C/C++ и объединенного массива макро и микропрофиля реальной дороги, разработана блок-схема в Matlab/Simulink и ПО.

3. Установлено, что разработанный вариант обмена информацией через три общих файла на SD диске Raspberry с определенной периодичностью (5 Гц) позволяет не снижать быстродействие и осуществлять моделирование в реальном масштабе времени.

4. Моделирование автомобиля бхб с  $m_a = 21200$  кг показало, что он имеет расход топлива 63,56 л/100 км, среднюю скорость 66,1 км/ч и число переключений КПП 7 (при  $t > 10$  с). Причем в основном переключение КПП происходит на 3-х последних высших передачах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Mercedes-Benz Innovation Vehicle Developing. <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/next/advanced-engineering/> [Электронный ресурс /Electronic resource] / – Режим доступа / Access mode: 22.07.2018.
2. Emanuele Obialero, A Refined Vehicle Dynamics Model for Driving Simulation // Charhalmer University of Technology / Göteborg, Sweden 2013. Master's thesis, P. 120.
3. Выгонный, А. Г. Закон переключения передач, оптимальный по тягово-скоростным и топливо-экономическим показателям магистрального автопоезда / А. Г. Выгонный, О. С. Руктешель, Р. Э. Шейбак // Актуальные вопросы машиностроения, 2015, Т. 4, С. 182–188.
4. Хачатуров А. А. Динамика системы дорога–шина–автомобиль–водитель / под ред. Хачатурова А. А. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
5. Hans B. Pacejka. Tyre and Vehicle Dynamics / The Netherlands, Second edition 2006. P. 642.
6. Михайлов, В. Г. Получение и использование единого массива продольного профиля и микропрофиля дороги для моделирования ТС// журнал автомобильных инженеров № 2, 2018, с. 4–7.
7. Михайлов В. Г. О колебательной модели грузового автомобиля / Д. В. Мишута, // Автомобильная промышленность. – 2016, № 7.

### REFERENCE

1. Mercedes-Benz Innovation Vehicle Developing. <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/next/advanced-engineering/> [Электронный ресурс /Electronic resource] / – Режим доступа/Access mode: 22.07.2018.
2. Emanuele Obialero, A Refined Vehicle Dynamics Model for Driving Simulation // Charhalmer University of Technology / Göteborg, Sweden 2013. Master's thesis, P. 120.
3. Vygonnyj A. G. Zakon pereklyucheniya peredach, optimal'nyj po tyagovo-skorostnym i toplivo-ekonomicheskim pokazatelyam magistral'nogo avtopoezda / A. G. Vygonnyj, O. S. Ruktessel', R. E. Shejbak // Aktual'nye voprosy mashinostroyeniya 2015, T. 4, S. 182–188.
4. Hachaturov A. A. Dinamika sistemy doroga–shina–avtomobil'–voditel' / pod red. Hachaturova A. A. – M. Mashinostroyenie, 1976. – 535 s.
5. Hans B. Pacejka. Tyre and Vehicle Dynamics / The Netherlands, Second edition 2006. P. 642.
6. Mikhailov V. G. Poluchenie i ispol'zovanie edinogo massiva prodol'nogo profilya i mikroprofilya dorogi dlya modelirovaniya TS// zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov № 2, 2018, s. 4–7.

Поступила  
18.02.2019

После доработки  
11.07.2019

Принята к печати  
01.10.2019

MIKHAILOV V. G.

## ABOUT SOME APPROACHES MODELING OF THE VEHICLE ON SIMULATOR

*The purpose of the given work is consideration and working off of approaches, techniques, schemes of realisation of modelling of the vehicle on simulators on the basis of a choice of more perfect models of movement, fluctuations, roadability of the vehicle in package Matlab/Simulink for reception and an estimation of parametres of the vehicle, it loading. Features of imi-*

tating modelling of the vehicle on a simulator; requirements to it, using methods of such modelling on the basis of computer models, hydropulsators and a moving platform with the monitors/projectors, simulating road conditions where reactions to it of the driver; movements essentially influencing modes and loading the vehicle with the further use of the received data at bench tests are considered are considered. Mathematical models of the tyre, movement, fluctuations, the roadabilities of the vehicle providing more correct modelling in real time are developed.

New approaches and technique in realisation of imitating modelling of movement, roadability and loading the vehicle, based on combined use of the powerful computer and minicomputer Raspberry for reading of parametres of controls, steering of visualisation of road conditions, module S-Function Builder created ON on C/C++ both an incorporated file longinal profile and a microprofile of real road, the information interchange organisation through three general files on SD disk Raspberry with certain periodicity (5 Hz) are offered, the block diagramme in Matlab/Simulink and is developed software. By the spent modelling of the vehicle 6x6 with  $m_a = 21200$  kg it is established that it has fuel consumption of km of 63,56 l/100, average speed of 66,1 km/h and number of switchings of a check point 7 (at  $t > 10$  c). And basically check point switching occurs on last 3 higher drives.

**Keywords:** the Vehicle, a mathematical model, simulation modeling, the unit the circuit of implementation of its driving, loading and controllability, a longitudinal profile, a road microprofile, Matlab/Simulink, S-Function Builder.



**Михайлов Владимир Георгиевич.** Специалист в области разработки систем CALS/PLM (PDM, ERP) PDM, ERP на Oracle на C++, PL/SQL, Java, программирования (32-х летний опыт) на C/C++, Windows, Rasbian, MC, Arduino/Raspberry, автомобилестроения, большой опыт моделирования динамических систем в пакете SIMULIK с использованием S-Function Builder, оценки напряженно-деформированного состояния в пакете ANSYS, испытанный подвесок, рам ТС, пневматики, гидравлики.

**Mikhailov Vladimir.** The expert in the field of system engineering CALS/PLM (PDM, ERP), programming application Oracle on C++, PL/SQL, Java, programming MC, motor industry, modeling of dynamic systems in package MATLAB/SIMULIK (with S-Function Builder), modeling dynamic systems, vibration. estimations of the intense-deformed state in packet ANSYS, to tests of suspension, frames of the vechicle, a pneumatics, hydraulics.