

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-322768>

Оригинальное исследование



Имитационная модель автомобиля в среде Simulink для определения расхода топлива в ездовых циклах

А.В. Химченко¹, Н.И. Мищенко², В.В. Быков²¹ Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Российская Федерация;² Донецкий национальный технический университет, Горловка, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В работе показана актуальность задачи определения объективных значений расходов топлива в эксплуатации на основе расчетных методов. Одним из таких методов является имитационное моделирование. Современное развитие компьютерной техники существенно упрощает реализацию системных имитационных моделей, например, в программном продукте Simulink компании Mathworks. При создании модели необходимо выдерживать баланс обобщения и детализации, так как излишняя детализация ведет к необоснованно глубокому рассмотрению отдельных элементов системы и к существенному увеличению времени моделирования.

Цель исследования — поиск рациональной структуры модели системы «водитель — автомобиль — окружающая среда», позволяющей обеспечить возможность испытания автомобиля в ездовых циклах или при других сценариях движения.

Материалы и методы. В работе использовалась среда имитационного моделирования Matlab Simulink. На основе анализа конструкции автомобиля и возможностей отдельных инструментов Simulink синтезировалась схема для исследования расхода топлива на примере легкового автомобиля. Полученная модель была отлажена для устойчивого движения автомобиля в различных ездовых циклах с помощью графического анализа.

Результаты. Полученные результаты показывают, что созданная системная имитационная модель работоспособна. Системы управления обеспечивают движение автомобиля согласно режимам смешанного ездового цикла с соблюдением требуемых допусков. Имеется возможность регистрации расходов топлива и других интересующих результатов моделирования.

Заключение. Модель показала относительную простоту настройки и возможность быстрой модернизации для перехода к другим моделям автомобилей. Требуется минимальное количество данных об автомобиле для приведения модели к работоспособному состоянию. Отдельные неизвестные параметры предполагается уточнять с помощью методов идентификации.

Ключевые слова: расход топлива; автомобиль; ездовые циклы; системное моделирование; имитационная модель; Matlab; Simulink.

Как цитировать:

Химченко А.В., Мищенко Н.И., Быков В.В. Имитационная модель автомобиля в среде Simulink для определения расхода топлива в ездовых циклах // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 4. С. 295–305. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-322768>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-322768>

Original Study Article

Simulation model of a vehicle in the Simulink environment for determining fuel consumption in driving cycles

Arkady V. Khimchenko¹, Nikolay I. Mishchenko², Valery V. Bykov²¹ Voronezh State Agrarian University named after Peter the Great, Voronezh, Russian Federation;² Automobile and Road Institute of the Donetsk National Technical University, Gorlovka, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The paper shows that the problem of determining objective indicators of fuel consumption in operation based on calculation methods remains relevant. One of these methods is simulation modeling. Current state of computer technology significantly simplifies building of system simulation models, for example, using the Simulink software by Mathworks. In the process of model development, it is necessary to keep the balance of generalization and detailing, since excessive detailing leads to an unreasonably deep consideration of individual elements of the system and to a significant increase in simulation time.

AIMS: Search for a reasonable structure of model of the “driver — car — environment” system, which makes it possible to simulate the car in driving cycles or other driving scenarios.

METHODS: The MATLAB/Simulink simulation environment was used in the study. Based on the analysis of the car design and the capabilities of individual Simulink tools, a block diagram to study fuel consumption using the example of a passenger vehicle was synthesized. The obtained model was debugged for the stable motion simulation of the vehicle in various driving cycles using graphical analysis.

RESULTS: The obtained results show that the developed system simulation model is well behaved. Control systems ensure the vehicle motion according to the mixed driving cycle modes in compliance with the required tolerances. It is possible to register fuel consumption and other simulation results of interest.

CONCLUSIONS: The model showed the relative simplicity of setting up and the ability of quick update for other vehicles. A minimal amount of vehicle data is required to bring the model to an operable condition. Particular unknown parameters are supposed to be refined using identification methods.

Keywords: fuel consumption; automobile; driving cycles; system modeling; simulation model; MATLAB; Simulink.

To cite this article:

Khimchenko AV, Mishchenko NI, Bykov VV. Simulation model of a vehicle in the Simulink environment for determining fuel consumption in driving cycles. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(4):295–305. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-322768>

Received: 08.04.2023

Accepted: 01.06.2023

Published online: 15.09.2023

и стандартизованы различными организациями, присутствует в Simulink и может быть использован в готовом виде. Однако, при необходимости, воспользовавшись редактором сценариев, можно создать собственные сценарии и обеспечить испытания, например, в соответствии с ГОСТ Р 54810-2011. Использование стандартного блока позволяет проводить контроль испытаний и отстраивать их в случае выхода за допустимые пределы основного контролируемого параметра: скорости движения автомобиля.

Для моделирования системы управления автомобилем в ездовом цикле использовался блок продольного водителя. В качестве регулятора было выбрано пропорционально-интегральное (ПИ) управление с отслеживанием усиления и прямой связи.

Такой контроллер управления показал наилучшие результаты в условиях жёсткого соблюдения режима движения. Что в целом и требуется от модели. При подборе его параметров использовались методы оптимизации с дальнейшей ручной корректировкой. Такой алгоритм был выбран исходя из желания минимизации времени настройки контроллера. Так как в модели использовались ещё две системы управления для выключения сцепления и управления коробкой переключения передач, отладка и настройка системы выполнялась последовательно с уточнением качества работы всех трёх систем. Кроме того, моделирование полного ездового цикла требовало больших затрат времени, поэтому первоначальная настройка контроллера осуществлялась на первом участке разгона-остановки в городском ездовом цикле. Это сокращало требуемое время на идентификацию модели контроллера, но параметры могли оказаться не оптимальными на других участках движения. В дальнейшем они уточнялись.

Другие блоки, изображённые на рис. 1, имеют вспомогательный характер и предназначены для регистрации данных, согласования входных и выходных сигналов, а также для исправления ошибок стандартных блоков.

Наиболее важным элементом системной модели является модель самого автомобиля.

Имитационная модель автомобиля в Simulink

Имитационное моделирование движения легкового автомобиля не может быть отвлечённым или обобщённым, так как каждый автомобиль имеет свои особенности. В модель необходимо закладывать параметры двигателя, трансмиссии, кузова автомобиля и так далее. В связи с этим, модель должна быть привязана к конкретному автомобилю. В работе в качестве примера был выбран автомобиль Chevrolet Niva с двигателем ВАЗ-2123. Выбран отечественный автомобиль, так как в информационном поле имеется достаточно данных о его характеристиках, устройстве отдельных агрегатов в различных модификациях. Имеются также данные

о расходах топлива в нормируемых ездовых циклах в соответствии с правилами ЕЭК ООН № 83 и № 101 и данные из практики эксплуатации.

На наш взгляд, при моделировании автомобиля для исследования расходов топлива в ездовых циклах или иных условиях движения необходимо соблюсти баланс между обобщением и детализацией моделей. Так нет необходимости в излишней детализации двигателя внутреннего сгорания. На расход топлива автомобиля оказывают влияние выходные характеристики двигателя: эффективная мощность, эффективный крутящий момент и часовой расход топлива. Выбор передачи для движения в определённых условиях будет зависеть от частоты вращения коленчатого вала и создаваемого крутящего момента. Таким образом, модель двигателя может быть достаточно укрупнённой. Так как на динамику автомобиля влияют инерционные характеристики двигателя, должен учитываться и его приведённый момент инерции.

Для обеспечения трогания автомобиля, переключения передач и остановки с работающим двигателем необходимо иметь детализированную коробку передач и сцепление. Эти подсистемы должны иметь свои блоки управления, обеспечивающие имитацию поведения водителя. Другие элементы трансмиссии должны обеспечивать реализацию в модели инерционных характеристик и передаточных чисел трансмиссии. Более подробная детализация, например, моделирование карданных валов, полуосей, является излишней. Кузов автомобиля может моделироваться на основе велосипедной модели, так как при исследовании расходов топлива в ездовых циклах движение автомобиля в повороте не рассматривается.

На основе изложенных соображений была получена системная имитационная модель автомобиля, которая представлена на рис. 2. При этом использовалась классическая велосипедная модель кузова автомобиля в виде готового блока и модель ходовой части, состоящая из двигателя, коробки переключения передач со сцеплением, раздаточной коробки, главных передач с дифференциалами и колес, снабжённых соответствующими тормозными механизмами.

Взаимодействие колёс с дорогой моделировалось с помощью эмпирической модели шины, известной как «Magic Formula» [10, 11]. Это позволило получить некоторые эффекты проскальзывания колеса и более реально реализовать динамические явления в трансмиссии. Тормозная система моделировалась максимально примитивно: в виде давления в рабочих тормозных цилиндрах, пропорционального сигналу органов управления. Коэффициент пропорциональности выбирался исходя из возможности обеспечения максимального замедления при максимальном сигнале на органах управления.

Модель автомобиля является наиболее сложной частью всей модели. При выполнении модели

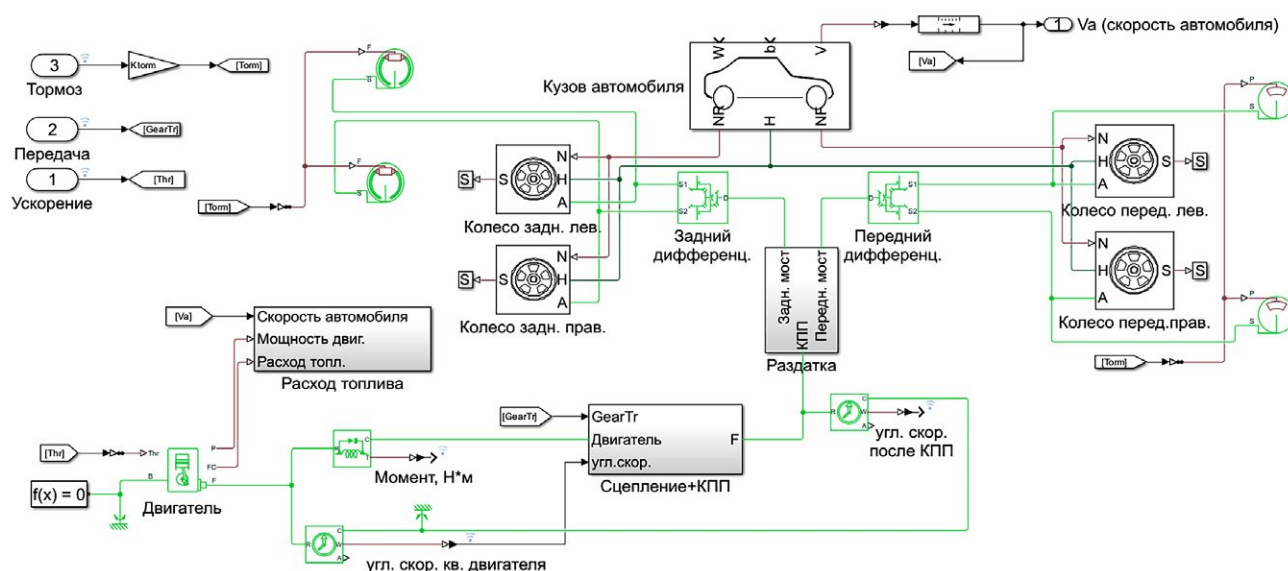


Рис. 2. Имитационная модель автомобиля Chevrolet Niva.
Fig. 2. The Chevrolet Niva simulation model.

на достаточно высоком уровне требуется ряд конструктивных данных о агрегатах, которые необходимы для правильного моделирования динамики автомобиля. Например, инерционные характеристики валов двигателя и трансмиссии. Информация о данных параметрах в широком доступе отсутствует. На начальном этапе моменты инерции принимались усреднёнными для данного типа автомобиля или оценивались по имеющимся чертежам, изображениям с конструктивными размерами. В дальнейшем приведенные моменты инерции трансмиссии и двигателя уточнялись методами идентификации модели для получения заданной динамики.

В качестве модели двигателя использовалась обобщённая модель (блок Engine на рис. 2). Модель позволяет выбирать тип зажигания: в данном случае искровой. Для каждого типа двигателя имеется возможность задать скоростные характеристики в виде полинома 3-й степени, известного как формула Лейдермана, или табличным способом.

Двигатель ВАЗ-2123 атмосферный и его характеристика достаточно хорошо может быть описана формулой Лейдермана. Поэтому по имеющимся внешним скоростным характеристикам серийных двигателей, снятых независимыми лабораториями [12], определялись коэффициенты формулы Лейдермана. Кроме того, в качестве исходных данных задавались частоты вращения коленчатого вала, соответствующие холостому ходу, номинальному режиму, а также максимально допустимая частота вращения и значение номинальной мощности двигателя.

Выбранный блок позволяет использовать пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) контроллеры для ограничения максимальной частоты вращения коленчатого вала и регулировки холостого хода. Для обеспечения устойчивого движения по ездовому

циклу ПИД контроллеры удобно настраивать на узкую полосу регулирования. Это обеспечивает устойчивую работу при трогании автомобиля с места за счёт подержки контроллера водителя.

При переключении передач возможно повышение частоты вращения при несогласованном отключении сцепления и управлении двигателем. Настройка ограничения позволила избежать остановки моделирования при превышении частоты вращения коленчатого вала на этапе отладки управления сцеплением и переключением передач.

Определение расходов топлива

Важным для данных исследований элементом является модель расхода топлива. Была выбрана модель в табличном виде, как соответствие секундного расхода топлива частоте вращения коленчатого вала и крутящему моменту двигателя. Такой выбор позволяет корректно моделировать расходы топлива на холостом ходу и фактически используется автопроизводителями в системах управления бензиновых двигателей.

На начальном этапе расход топлива задавался ориентировочно, как для аналогичных типов двигателей. В последующих численных экспериментах значения в таблице расхода топлива, соответствующие определенным режимам работы двигателя, предполагается уточнить с помощью методов идентификации.

По результатам моделирования определялись: мгновенный удельный эффективный расход топлива, а также мгновенный, суммарный и средний путевые расходы топлива. Модели определения расходов топлива показаны на рис. 3 и 4. Полученные значения регистрировались на всем протяжении ездового цикла.

На приведенных рис. 3 и 4 реализованы известные зависимости с учетом приведения к удобным

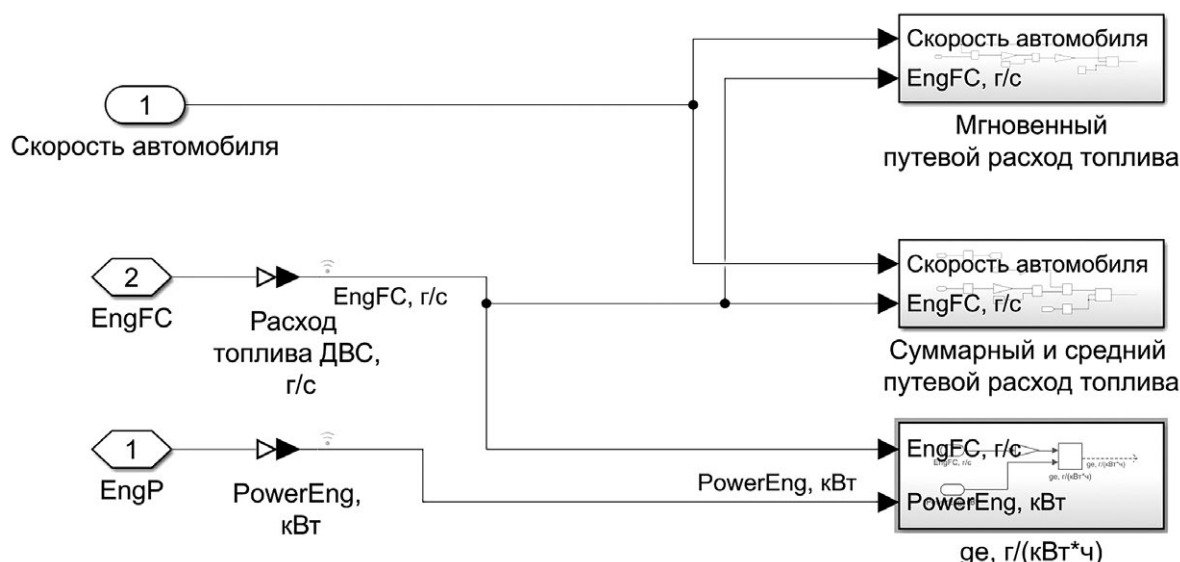


Рис. 3. Подсистема определения расходов топлива в процессе имитации.

Fig. 3. The subsystem for determining fuel consumption during simulation.

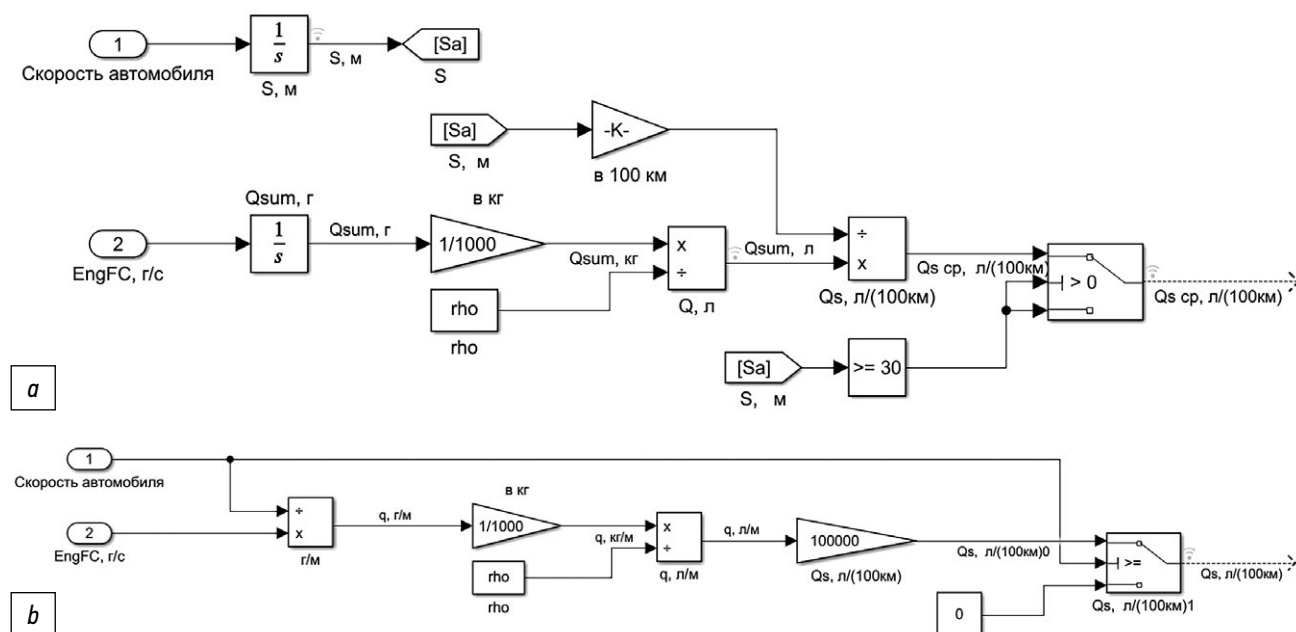


Рис. 4. Модели определения суммарного и среднего путевого (а) и мгновенного путевого (б) расходов топлива в процессе имитации.

Fig. 4. Models for determining the total and average (a) and instantaneous (b) fuel consumption during simulation.

единицам измерения. Для мгновенного путевого расхода топлива

$$Q_s = \frac{G_T}{V_a \rho_T}, \quad (1)$$

где G_T — мгновенный часовой расход топлива; V_a — мгновенная скорость автомобиля, ρ_T — плотность топлива.

Следует заметить, что при остановке автомобиля с работающим двигателем мгновенный путь расход топлива стремится к бесконечности. Для удобства

графического отображения на этом режиме он полагался равным 0. Так как в дальнейших расчетах эта величина не участвует, данный алгоритмический шаг не приводит к возникновению неточностей, а способствует удобству анализа результатов.

Для среднего путевого расхода топлива:

$$Q_{s\text{cp}} = \frac{\int_0^t G_T dt}{\rho_T \int_0^t V_a dt}. \quad (2)$$

С учетом возможной работы двигателя на холостом ходу до начала движения для удобства в дальнейшем масштабирования графиков и анализа результатов регистрации среднего путевого расхода топлива следует начинать при проезде небольшого участка, например после первых 30 м. Это исключает значения средних расходов, стремящихся к бесконечности.

Зависимость

$$Q_{\Sigma} = \int_0^t G_T dt \quad (3)$$

является суммарным расходом топлива за время испытания.

Модель трансмиссии

Для моделирования трансмиссии использовались имеющиеся блоки моделирования сцепления, зубчатых передач, дифференциалов и более сложные блоки синхронизаторов.

Передаточные числа зубчатых зацеплений соответствовали параметрам трансмиссии автомобиля. Некоторые блоки необходимо было только настроить. Модели коробки переключения передач (рис. 5) и раздаточной коробки были созданы из имеющихся блоков в соответствии с конструкцией моделируемого автомобиля.

Кроме того, модель коробки и модель сцепления были дополнены моделями управления, которые обеспечивали своевременное и качественное переключение передач в соответствии с требованиями программы испытаний.

Модель управления сцеплением реализовывала логику управления водителем при трогании автомобиля

с места и переключении передач. При некоторой настройке модель позволяет обеспечить плавное трогание автомобиля с любым заданным ускорением. Частота вращения коленчатого вала двигателя может повышаться или удерживаться на уровне холостого хода в зависимости от настройки пробуксовки сцепления при включении передачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученная имитационная модель после отладки показала свою работоспособность. Системы управления обеспечивают движение автомобиля согласно режимам смешанного ездового цикла с соблюдением требуемых допусков (рис. 6).

Как видно из графиков, всплески и колебания, присутствующие при переключении передач, а также несоответствия при трогании и разгоне незначительны и не выходят за допустимые границы ± 2 км/ч ($\pm 0,56$ м/с). Максимальные отклонения в 1,7 м/с наблюдались при включении пониженной передачи перед участком торможения двигателем. Это допустимо, но может быть при необходимости устранено при совершенствовании алгоритмов управления.

Характер зависимостей частоты вращения коленчатого вала (рис. 7) и мгновенного путевого расхода топлива (рис. 8), полученных при моделировании, выглядят вполне адекватно. Колебания значений, всплески и изменения на отдельных участках имеют логичные объяснения и связаны с характером изменения режимов работы двигателя, в том числе при переключении передач, разгоне и т.д.

Абсолютные значения на графиках рис. 8 на этапе отладки получаются приближительными и с достаточной

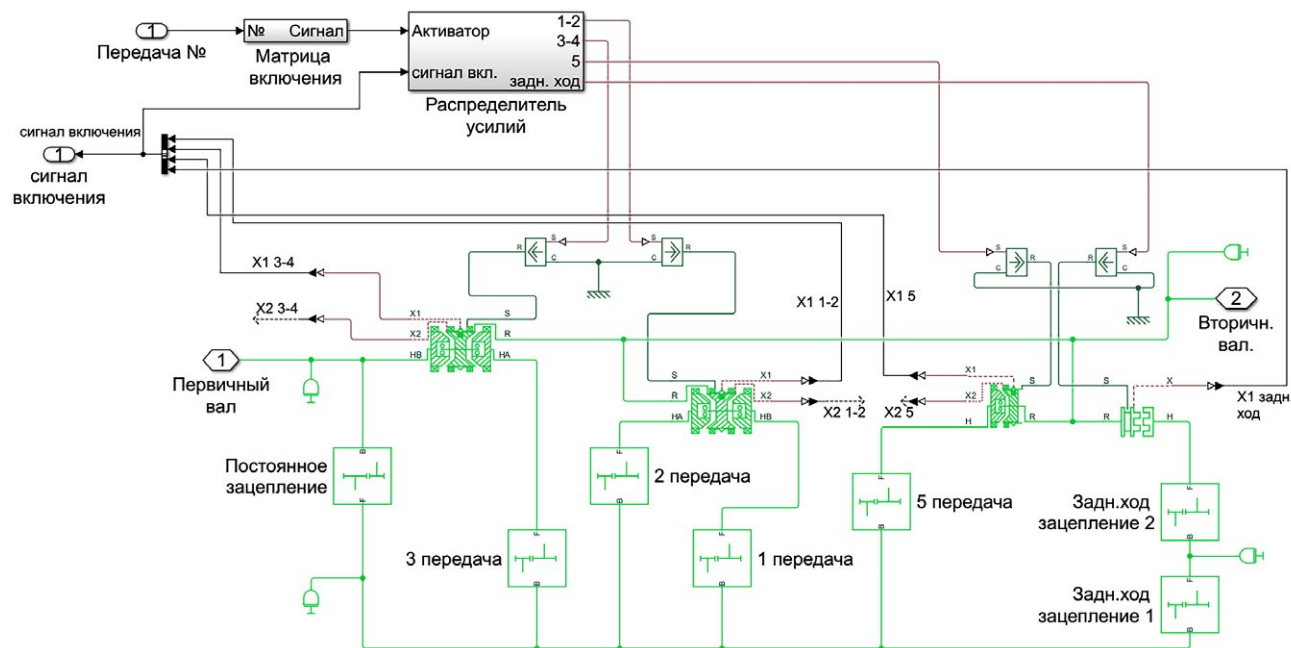


Рис. 5. Модель коробки переключения передач Chevrolet Niva.
Fig. 5. The Chevrolet Niva gearbox model.

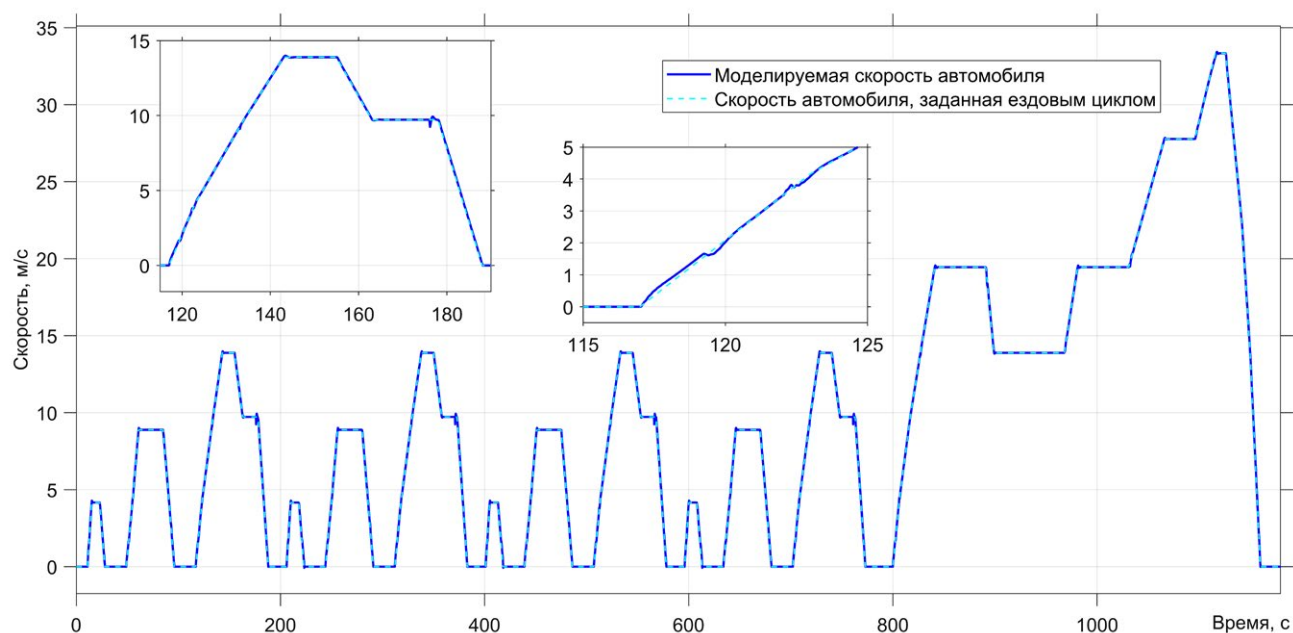


Рис. 6. Скорость автомобиля во время испытания в цикле NEDC.

Fig. 6. Vehicle speed during the test NEDC test.

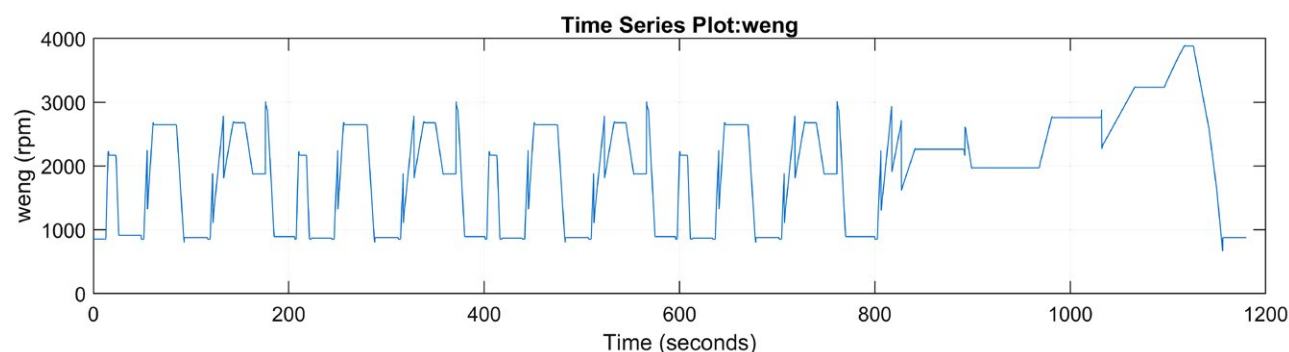


Рис. 7. Зависимость частоты вращения коленчатого вала двигателя ВАЗ 2123 в цикле NEDC при испытаниях Chevrolet Niva.

Fig. 7. Crankshaft speed of the VAZ 2123 engine during the Chevrolet Niva testing in the NEDC cycle.

точностью будут отражать процесс после идентификации модели.

Созданная системная модель позволяет испытывать автомобиль в различных условиях движения. Кроме того, детализация модели позволяет получать данные о работе отдельных агрегатов. Однако, в зависимости от целей и задач, поставленных в исследовании, модели отдельных ее подсистем или системы в целом должны быть идентифицированы, что позволит доверять полученному результату.

Для исследования топливной экономичности автомобиля возможно пренебречь точностью описания механических потерь в трансмиссии. Так как эти потери зависят от режима движения автомобиля и в конечном итоге привязаны к режиму работы двигателя, они могут быть учтены непосредственно в виде дополнительного

расхода топлива [13, 14]. Такой вариант можно реализовать при дальнейшей идентификации по данным о расходе топлива в известных режимах или ездовых циклах.

На основе полученной модели в дальнейших исследованиях возможно получение данных о расходе топлива для стандартных дорожных испытаний в соответствии с ГОСТ. При этом требуется замена модуля, генерирующего данные о режимах движения автомобиля, с учетом особенностей конкретных испытаний [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования показали работоспособность системной модели, относительную простоту настройки и необходимость в минимальном количестве

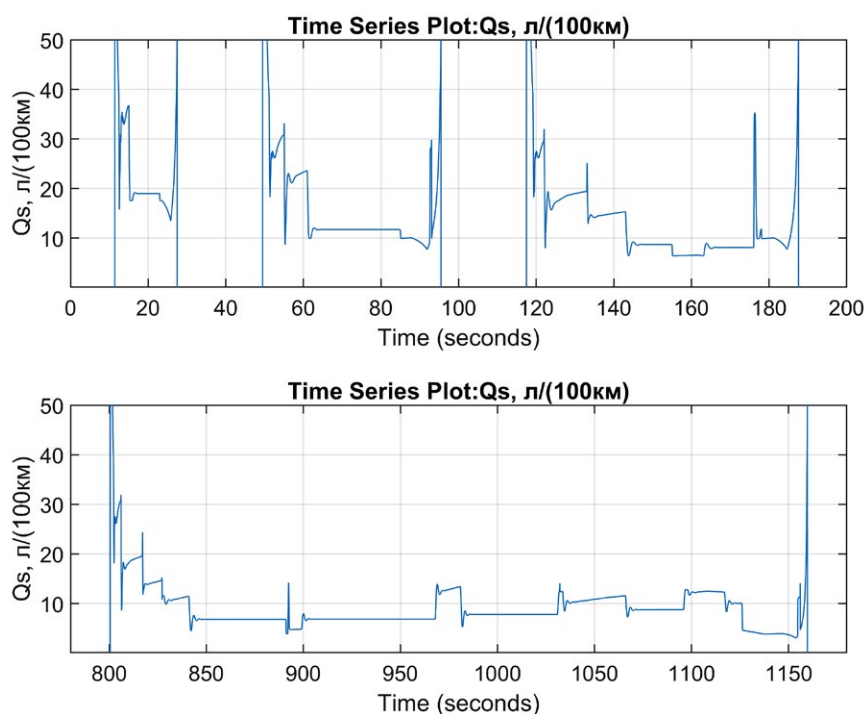


Рис. 8. Зависимость мгновенного путевого расхода топлива на участках цикла NEDC при испытаниях автомобиля.
Fig. 8. Dependence of the instantaneous travel fuel consumption at the sections of the NEDC cycle during vehicle testing.

данных об автомобиле для приведения её к работоспособному состоянию. Неизвестные параметры модели могут быть получены в процессе идентификации. Важным моментом является возможность внесения изменений и, благодаря небольшим доработкам, относительно лёгкий переход к другим моделям автомобилей.

Полученный тип системной модели «водитель — автомобиль — окружающая среда» с реализованным уровнем детализации может быть взят за основу для исследования топливной экономичности автомобиля в различных ездовых циклах.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Вклад распределён следующим образом: А.В. Химченко — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, создание и отладка модели, написание текста статьи; Н.И. Мищенко — обзор литературы, анализ литературных источников, анализ результатов, подготовка и редактирование статьи; В.В. Быков — обзор литературы, проведение тестовых экспериментов, редактирование статьи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. The contribution is distributed as follows: A.V. Khimchenko — literature review, search for publications, building and debugging of the model, writing the text of the manuscript; N.I. Mishchenko — literature review, analysis of literary sources, analysis of results, preparation and editing the text of the manuscript; V.V. Bykov — literature review, conduction test experiments, editing the text of the manuscript. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. The authors declare no external funding for the study and publication.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов А.Е., Максимов В.А., Поживилов Н.В. Анализ методов автоматизированного учета расхода моторного топлива на городских автобусах ГУП «Мосгортранс» // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта. Сборник научных трудов, посвященный 85-летию кафедры ЭАТиС МАДИ, по материалам 79-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ. Москва, С. 20–26.
2. Распоряжение Минтранса России от 14.03.2008 N AM-23-р (ред. от 14.07.2015). О введении в действие методических рекомендаций «Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте». [дата обращения: 08.04.2023] Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/file/393913>
3. Болоев П.А., Петров Н.В., Скрыбыкин Ф.А. Разработка методики нормирования маршрутного расхода топлива автобуса ЛИАЗ-5256.57 в эксплуатации // Тракторы и сельхозмашины. 2021. Т. 88, №6. С. 90–98. doi: 10.17816/0321-4443-2021-6-90-98
4. Борисов Г.В., Лелиовский К.Я., Пачурин Г.В. К вопросу о нормировании расхода жидких топлив на автомобильном транспорте // Фундаментальные исследования. 2015. № 3. С. 28–35.
5. Маняшин С.А. Моделирование расхода топлива автомобилями на базе ездового цикла в низкотемпературных условиях эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук. Оренбург, 2013.
6. Огороднов С.М., Зезюлин Д.В., Макаров В.С., и др. Разработка расчетно-экспериментальной методики оценки расхода топлива при движении автомобиля по заданному маршруту // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. [дата обращения: 08.04.2023] Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=14280>
7. Суматохин Д.Г. Повышение эффективности разработки индивидуальных маршрутных норм расхода топлива для городских автобусов : дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2012.
8. Химченко А.В., Мищенко Н.И. Составление ездового цикла автомобиля путем аппроксимации отфильтрованных экспериментальных данных с помощью нейронных сетей // Вести Авто-мобильно-дорожного института. 2018. 4(27). С. 3–13.
9. Дрючин Д.А., Булатов С.В., Загидуллин Р.Р. Методика корректировки нормативной периодичности технического обслуживания автотранспортных средств на основе данных о фактическом расходе топлива // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2022. № 1. С. 93–101. doi: 10.25198/2077-7175-2022-1-93
10. Pacejka H.B., Besselink I.J.M. Magic Formula Tyre Model with Transient Properties // International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. 1997. Vol. 27, N sup001. doi: 10.1080/00423119708969658
11. Besselink I.J.M., Schmeitz A.J.C., Pacejka H.B. An improved Magic Formula/Swift tyre model that can handle inflation pressure changes // International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. 2010. Vol. 48, N sup1:IAVSD Supplement. P. 337–352. doi: 10.1080/00423111003748088
12. ВСХ Шеви-Нива. Мастер Мотор. [дата обращения: 17.05.2022] Режим доступа: <http://www.mmotor.ru/cams/index.php?action=vsh>
13. Гуров М.Н., Московкин В.В. Формула топливного баланса автомобиля // Транспорт на альтернативном топливе. 2012. № 3(27). С. 58–61.
14. Гуров М.Н., Московкин В.В., Егорушкин Е.А. Оценка эффективности применения различных мероприятий для снижения расхода топлива у АТС // Международная научно-техническая конференция «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» («МНТК ФТИ-2017»). Сборник научных трудов / под ред. М. Ф. Булатова. Москва, 2017. С. 189–192.
15. Химченко А.В., Мищенко Н.И., Петров А.И., Мамонтов В.Р. Особенности моделирования стандартных дорожных испытаний для определения топливной экономичности автомобиля // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса. Материалы VIII международной научно-практической конференции «Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса» в рамках 8-го Международного научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса: Инфра-структурное и социально-экономическое развитие», 25 мая 2022. Горловка, 2022. С. 73–77.

REFERENCES

1. Andrianov AE, Maksimov VA, Pozhivilov NV. Analysis of methods for automated accounting of motor fuel consumption on city buses of the State Unitary Enterprise "Mosgortrans". In: *Problems of technical operation and auto service of rolling stock of automobile transport. Collection of scientific papers dedicated to the 85th anniversary of the MADI EATiS Department, based on the materials of the 79th scientific, methodological and research conference of MADI*. Moscow; 2021:20–26. (in Russ).
2. Rasporyazhenie Mintransa Rossii ot 14.03.2008 N AM-23-r (red. ot 14.07.2015). O vvede-nii v deystvie metodicheskikh rekomendatsiy «Normy raskhoda topliv i smazochnykh materialov na avtomobilnom transporte». (in Russ). Accessed: 08.04.2023. Available from: <https://mintrans.gov.ru/file/393913>
3. Boleev PA, Petrov NV, Skrybykin FA. Development of a methodology for normalizing route fuel consumption of the LIAZ-5256.57 bus in operation. *Tractors and agricultural machinery*. 2021;88(6):90–98. (in Russ). doi: 10.17816/0321-4443-2021-6-90-98
4. Borisov GV, Leliovsky KYa, Pachurin GV. On the issue of rationing liquid fuel consumption in road transport. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2015;3:28–35. (in Russ).
5. Manyashin SA. Modelirovanie raskhoda topliva avtomobilyami na baze ezdogovogo tsikla v nizkotemperaturnykh usloviyakh ekspluatatsii [dissertation] Orenburg; 2013. (in Russ).
6. Ogorodnov SM, Zezyulin DV, Makarov VS, et al. Development of a computational and experimental methodology for estimating fuel consumption when a car moves along a given route. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014;4. (in Russ). Accessed: 08.04.2023. Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=14280>
7. Sumatokhin DG. Povyshenie effektivnosti razrabotki individualnykh marshrutnykh norm raskhoda topliva dlya gorodskikh avtobusov [dissertation] Moscow; 2012. (in Russ).
8. Khimchenko AV, Mishchenko NI. Compiling the driving cycle of a car by approximating filtered experimental data using

neural networks. *Bulletin of the Automobile and Road Institute*. 2018;4(27):3–13. (in Russ).

9. Dryuchin DA, Bulatov SV, Zagidullin RR. Methodology for adjusting the standard frequency of vehicle maintenance based on data on actual fuel consumption. *Intellect. Innovatsii. Investitsii*. 2022;1:93–101. (in Russ). doi: 10.25198/2077-7175-2022-1-93

10. Pacejka HB, Besselink IJM. Magic Formula Tyre Model with Transient Properties. *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 1997;27(sup001). doi: 10.1080/00423119708969658

11. Besselink IJM, Schmeitz AJC, Pacejka HB. An improved Magic Formula/Swift tyre model that can handle inflation pressure changes. *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 2010;48(sup1:IAVSD Supplement):337–352. doi: 10.1080/00423111003748088

12. VSH Chevy-Niva. Master Motor. (in Russ). Accessed: 08.04.2023. Available from: <http://www.mmotor.ru/cams/index.php?action=vsh>

13. Gurov MN, Moskovkin VV. Car fuel balance formula. *Transport na alternativnom toplive*. 2012;3(27):58–61. (in Russ).

14. Gurov MN, Moskovkin VV, Egorushkin EA. Assessing the effectiveness of using various measures to reduce fuel consumption in vehicles. In: *International scientific and technical conference "Informatics and technology. Innovative technologies in industry and computer science" ("MNTK FTI-2017")*. Collection of scientific papers / ed. M. F. Bulatova. Moscow; 2017:189–192. (in Russ).

15. Khimchenko AV, Mishchenko NI, Petrov AI, et al. Features of modeling standard road tests to determine the fuel efficiency of a car. In: *Scientific and technical aspects of the development of the motor transport complex. Materials of the VIII international scientific and practical conference "Scientific and technical aspects of the development of the motor transport complex" within the framework of the 8th International Scientific Forum of the Donetsk People's Republic "Innovative prospects of Donbass: Infrastructural and socio-economic development"*, May 25, 2022. Gorlovka; 2022:73–77. (in Russ).

ОБ АВТОРАХ

* Химченко Аркадий Васильевич,

доцент, канд. техн. наук,
доцент кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов
и автомобилей;
адрес: Российская Федерация, 394087, Воронеж,
ул. Мичурина, д. 1;
ORCID: 0000-0002-9340-4252;
eLibrary SPIN: 4568-1757;
e-mail: himch.arkady@yandex.ru

Мищенко Николай Иванович,

профессор, д-р техн. наук,
заведующий кафедрой автомобильного транспорта;
ORCID: 0000-0002-0390-1563;
eLibrary SPIN: 6604-8459;
e-mail: mim2802@mail.ru

Быков Валерий Васильевич,

доцент, канд. техн. наук,
декан автомобильно-дорожного факультета;
ORCID: 0000-0002-4362-0053;
eLibrary SPIN: 8378-0977;
e-mail: bykov_v_@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

* Arkady V. Khimchenko,

Associate Professor, Cand. Sci. (Tech.),
Associate Professor of the Agricultural Machines, Tractors
and Automobiles Department;
address: 1 Michurina street, 394087 Voronezh,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-9340-4252;
eLibrary SPIN: 4568-1757;
e-mail: himch.arkady@yandex.ru

Nikolay I. Mishchenko,

Professor, Dr. Sci. (Tech.),
Head of the Automobile Transportation Department;
ORCID: 0000-0002-0390-1563;
eLibrary SPIN: 6604-8459;
e-mail: mim2802@mail.ru

Valery V. Bykov,

Associate Professor, Cand. Sci. (Tech.),
Dean of the Automobile and Road Construction Faculty;
ORCID: 0000-0002-4362-0053;
eLibrary SPIN: 8378-0977;
e-mail: bykov_v_@mail.ru

* Corresponding author