

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-321934>

Оригинальное исследование



Разработка имитационной модели для тестирования функции распределения крутящего момента по осям электромобиля с двухмоторной схемой

М.Д. Мизин, А.Н. Малышев, А.М. Заватский, В.В. Дебелов

Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (НАМИ), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рынок автомобилей, использующих в качестве источника энергии электричество, показывает существенный рост. На данный момент на дорогах по всему миру находится более двадцати миллионов электромобилей. Ведущие мировые производители уделяют пристальное внимание развитию электрического транспорта ввиду более низких затрат при эксплуатации транспортного средства, удобства в управлении, а также нулевых выбросах в окружающую среду и почти полной бесшумности во время движения. Использование полного привода на электромобиле позволяет увеличить проходимость транспортного средства, обеспечивает более сбалансированное управление шасси, четкое следование траектории и постоянную точность рулевого управления.

Цель исследования — обеспечение повышения курсовой устойчивости транспортного средства, реализации максимального крутящего момента относительно условий движения транспортного средства и противодействие пробуксовки в двухмоторных схемах электрического транспорта.

Метод. Для решения поставленной задачи предполагается внедрение специального алгоритма распределения крутящего момента по ведущим осям электромобиля. В данной статье представлена разработка имитационной модели транспортного средства, выполненная в среде *Simcenter Amesim*, учитывающая динамические характеристики и особенности транспортного средства, реализованная на аппаратно-программируемом комплексе *Labcar*.

Результат. Результатом моделирования является сравнение с данными, полученными при натурных испытаниях прототипа и подтверждающими цель разработки имитационной модели, а именно — возможность проверки и предварительной настройки алгоритма распределения крутящего момента по ведущим осям транспортного средства.

Заключение. На основе результатов испытаний созданного комплекса можно сделать вывод, что разработанный модельный комплекс подходит для решения целей моделирования, в том числе для исследования, отладки и первичных калибровок алгоритма распределения крутящего момента по ведущим осям полноприводного электрического транспортного средства. Погрешности при моделировании режимов работы, соответствующих продольной и поперечной динамике прототипа, не превышают 7,5%, что соответствует целям моделирования.

Ключевые слова: электромобиль; полный привод; распределение момента; программно-аппаратное тестирование; имитационная модель, аппаратно-программируемый комплекс.

Как цитировать:

Мизин М.Д., Малышев А.Н., Заватский А.М., Дебелов В.В. Разработка имитационной модели для тестирования функции распределения крутящего момента по осям электромобиля с двухмоторной схемой // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 3. С. 295–304.

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-321934>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-321934>

Original study article

Development of the simulation model for testing the axial torque distribution in an electric vehicle with the dual-motor layout

Maxim D. Mizin, Andrey N. Malyshev, Alexander M. Zavatsky, Vladimir V. Debelov

Central Scientific and Research Institute of Automobiles and Automotive Engines NAMI, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The market of vehicles using electricity as an energy source demonstrates significant growth. Currently, there are more than twenty million electric vehicles worldwide. Leading manufacturers give the high priority to development of electric transport due to lower vehicle service costs, ease of driving as well as zero emissions in environment and almost complete noiselessness at motion. In addition, using the full-wheel drive in an electric vehicle makes it possible to improve off-road capability, ensures more balanced chassis control, precise following the path and constant accuracy of steering.

AIMS: Ensuring increase in vehicle course stability, delivering the maximal torque regarding vehicle motion conditions and slip control in dual-motor layouts of electric vehicles.

METHODS: In order to solve the given task, implementation of the special-purpose algorithm of torque distribution between driving axles of an electric vehicle is assumed. The paper presents the development of the simulation model of a vehicle, built in the Simcenter Amesim software and considering dynamic properties and features of the vehicle. This model was implemented into the Labcar hardware-in-the-loop facility.

RESULTS: The simulation result is comparison with the data obtained during ground testing of the prototype and confirming the aim of simulation model development, in particular the capability of revision and preliminary setting up the algorithm of torque distribution between driving axles of a vehicle.

CONCLUSIONS: Based on the results of the testing of the developed facility, it can be concluded that the developed simulation facility is suitable for solving the simulation tasks including research, debugging and primary calibrations of the algorithm of torque distribution between driving axles of a full-wheel driven electric vehicle. The errors at simulation of operation modes relevant to longitudinal and lateral dynamics of the prototype is no more than 7.5% that complies with the simulation aims.

Keywords: electric vehicle; full-wheel drive; torque distribution; hardware-in-the-loop testing; simulation model; hardware-in-the-loop facility.

To cite this article:

Mizin MD, Malyshev AN, Zavatsky AM, Debelov VV. Development of the simulation model for testing the axial torque distribution in an electric vehicle with the dual-motor layout. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023;17(3):295–304. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-321934>

Received: 06.04.2023

Accepted: 30.08.2023

Published online: 15.10.2023

ВВЕДЕНИЕ

Тестирование разработанных алгоритмов управления транспортным средством является довольно проблемной задачей ввиду множества причин. Проверка разработанной функции управления подразумевает испытания на натурных стендах, либо на прототипе транспортного средства. Сложность исполнения натурального стенда зависит от испытаний конкретной системы и может повлечь существенные временные и финансовые затраты, ошибка в алгоритме может вывести из строя как объект испытаний, так и испытательный стенд, а в определённых случаях может быть опасна для самого оператора. Испытания на прототипе увеличивают возможные неблагоприятные последствия во время апробации определённой функции управления. Кроме того, существуют виды испытаний, которые невозможно выполнить на натурном объекте ввиду потенциального выхода из строя испытуемой системы: испытания на отказы системы, испытания длительной работы на предельных характеристиках функционирования объекта, намеренные аварийные режимы работы.

С целью минимизации такого рода последствий, разработчику необходимо выполнить предварительную проверку разработанного алгоритма. Такая проверка обычно выполняется в несколько этапов [1]:

1. *MiL*-тестирование — испытание алгоритма управления в среде моделирования с использованием для взаимодействия с алгоритмом модели объекта управления. Применяется с целью проверки логики управления объектом.
2. *SiL*-тестирование — взаимодействие модели объекта управления с программным кодом, включающим логику управления этим объектом. Применяется для проверки отработки программного кода и аппаратной реализации.
3. *PiL*-тестирование — взаимодействие модели объекта управления с имитацией процессора, в котором реализован программный код, включающий алгоритм управления объектом. Применяется с целью проверки способности процессора выполнить разработанную логику управления.
4. *HiL*-тестирование — взаимодействие блока управления с моделью объекта управления. Применяется с целью проверки отработки блока управления, включающего логику управления тестируемой системой, так называемое программно-аппаратное моделирование.

В данной статье описаны этапы *HiL*-тестирования, а именно: методика разработки и состав имитационной модели, структура программно-аппаратного стенда; а также предоставлены результаты, подтверждающие цели разработки.

МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

В качестве среды разработки модели используется программное обеспечение *Simcenter Amesim*, благодаря широкой библиотеке элементов, описывающих движение автомобиля, а также предоставляющее возможность совмещать элементы с разной физической природой (механические, электрические, термодинамические).

Структура модели (рис. 1):

- 1) блок, описывающий инерционные характеристики поддрессоренной части автомобиля и кинематику подвески;
- 2) блок, описывающий упруго-демпфирующие характеристики подвески;
- 3) блок, учитывающий аэродинамическое сопротивление;
- 4) рулевой механизм;
- 5) подмодель тормозных элементов;
- 6) подмодель колеса и контакта колеса с дорожной поверхностью;
- 7) блок, учитывающий сцепные свойства дорожной поверхности;
- 8) блок профиля дорожной поверхности;
- 9) подмодель дифференциалов;
- 10) подмодель электродвигателей;
- 11) подмодель высоковольтной батареи;
- 12) подмодель редуктора;
- 13) датчики скорости и ускорения центра масс автомобиля;
- 14) датчики скорости и вращения колес.

Модель представляет собой замкнутую систему элементов, каждый из которых содержит математическое описание.

Центральный элемент модели — блок, включающий учёт инерционных характеристик поддрессоренной части и кинематики подвески (рис. 2), описывает 15 степеней свободы, определяющих состояние автомобиля: угол рыскания, продольный угол, угол крена, перемещение центра масс относительно трёх осей (продольная, поперечная, вертикальная), вертикальное перемещение шпинделей четырёх колёс, вращение четырёх колёс относительно шпинделя, перемещение рулевой рейки относительно поперечной оси.

Математическое описание подвески выполнено на основе упрощённой схемы, перемещение шпинделя относительно кузова описано в системе координат кузова $R_1(x_1, y_1, z_1)$.

Полное линейное перемещение шпинделя относительно кузова определяется при помощи таблиц, в зависимости от относительного вертикального перемещения z_{rel} , относительного перемещения противоположного колеса z_{opp} и поперечного перемещения y , определяемого перемещением рулевой рейки.

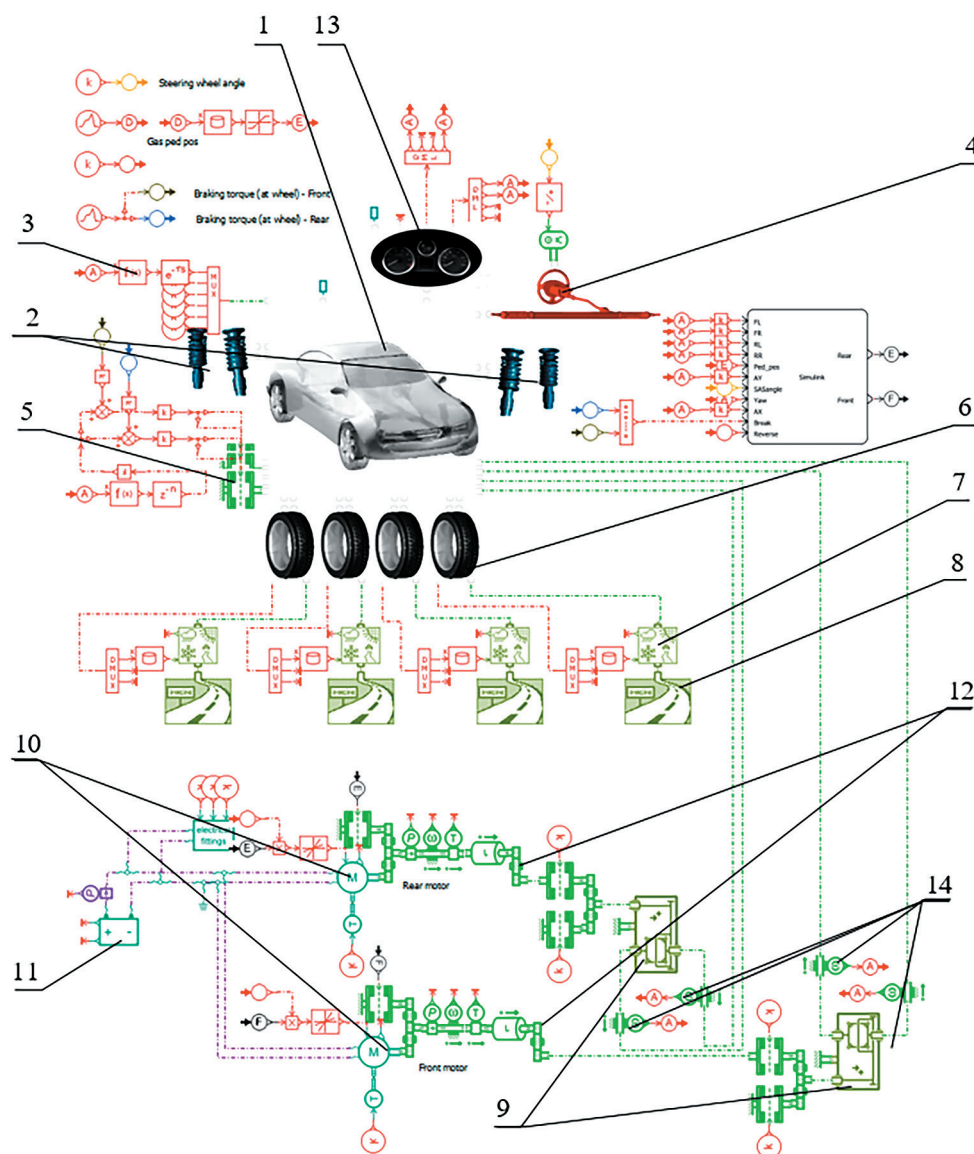


Рис. 1. Структура модели транспортного средства.

Fig. 1. Architecture of the model of a vehicle.

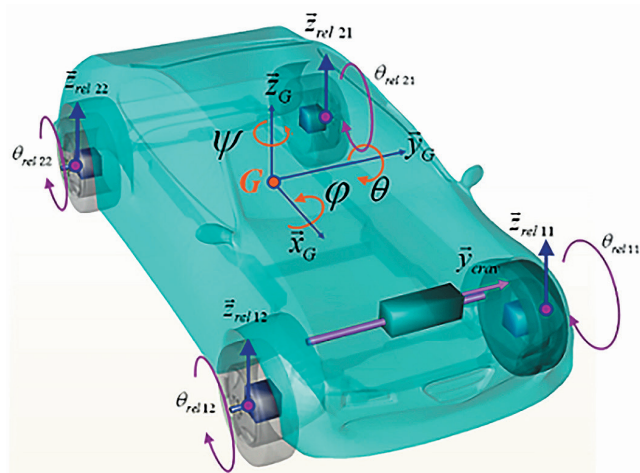


Рис. 2. Переменные, рассчитываемые в блок инерционных характеристик и кинематики подвески.

Fig. 2. Variables calculated for the module of inertia properties and suspension kinematics.

Угловое перемещение шпинделя относительно кузова описывается по такой же логике и определяется при помощи таблиц.

Рулевой механизм представляет собой преобразование вращательного движения рулевой колонки в поступательное движение рулевой рейки. В основе этого элемента находится шестерня-рейка, имеющая три входных и три выходных переменных, связанных выражениями:

$$x_1 = (\theta_2 - offset) \cdot r, \quad (1)$$

$$v_1 = w_2 \cdot r, \quad (2)$$

$$T_2 = F_1 \cdot r, \quad (3)$$

где x_1 — поступательное перемещение рейки, (м); v_1 — поступательная скорость рейки (м/с); θ_2 — угловое

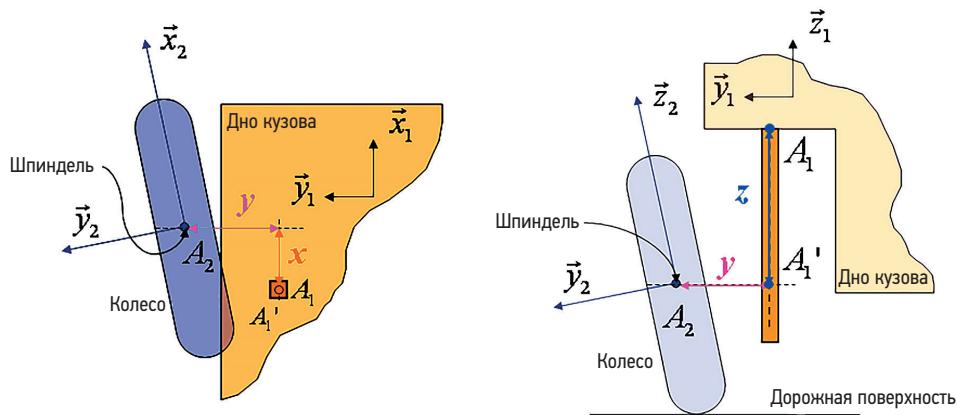


Рис. 3. Упрощённая схема подвески: A_1 — фиксированная точка на кузове; A_1' — точка, перемещающаяся по оси z_1 в системе координат кузова; A_2 — точка, соответствующая реальному центру колеса.

Fig. 3. The simplified scheme of suspension: A_1 — the point fixed to the body; A_1' — the point moving along the z_1 axis in the body reference frame; A_2 — the point of real wheel center.

перемещение шестерни, ($^\circ$); *offset* — угол шестерни при нулевом смещении рейки, ($^\circ$); w_2 — угловая скорость шестерни, (об/мин); r — радиус делительной окружности шестерни, (мм); F_1 — усилие на рейке (Н); T_2 — крутящий момент на шестерне (Нм).

Блок, описывающий упруго-демпфирующие характеристики подвески. Возвращает вертикальную силу, рассчитанную по смещению и скорости точки A_1' относительно точки A_1 .

$$F = F_{spr} + F_{dmp}, \quad (4)$$

где

$$F_{spr} = f(A_1, A_1'). \quad (5)$$

Упругая сила, которая определяется двумя коэффициентами — жёсткость пружины и жёсткость отбойника (Н/м).

$$F_{dmp} = f(V_{z1}). \quad (6)$$

Демпфирующая сила, которая определяется переменным коэффициентом демпфирования, задаваемым таблично (Н/м/с).

Аэродинамическое сопротивление приложено к центру масс и рассчитывается по формуле [2]:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho S C_f V^2, \quad (7)$$

где V — текущая скорость воздуха относительно автомобиля, (м/с); ρ — плотность воздуха, (кг/м³); S — площадь фронтальной поверхности, (м²); C_f — коэффициент обтекаемости.

Торможение в модели осуществляется при помощи элемента, генерирующего вращательный момент сухого трения. Задаётся напрямую сигналом тормозного

момента, рассчитываемого регулятором скорости. Работа систем *ABS* и *ESP* не учитывается.

Ввиду того, что модель колеса не учитывает сопротивление качению, момент сопротивления качению реализован при помощи дополнительного момента трения [3]. Таким образом, общий момент на тормозных колодках:

$$T_{тр} = T_{торм} + T_{сопр}, \quad (8)$$

где $T_{торм}$ — тормозной момент, запрашиваемый регулятором скорости, (Нм); $T_{сопр}$ — момент сопротивления качению, (Нм):

$$T_{сопр} = (0.01 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot V^2) \cdot M \cdot g \cdot R_D, \quad (9)$$

где V — текущая скорость транспортного средства, (м/с); M — масса транспортного средства, (кг); g — ускорение свободного падения, (м/с²); R_D — динамический радиус колеса, (м).

Для математического описания динамики взаимодействия шины с дорогой использована формула Пасейки [4]:

$$Y(x) = D \cdot \sin(C \cdot \arctg(B_x - E(B_x - \arctg(B_x)))) + S_v, \quad (10)$$

где B , C , D , E , S — эмпирические коэффициенты.

Несмотря на недостатки формулы в виде сложности и необходимости большого количества эмпирических коэффициентов, она является наиболее точным описанием поведения шины в контакте с дорожной поверхностью.

Также коэффициент D определяет сцепление шины с дорогой, блок учёта сцепных свойств с дорожной поверхностью позволяет при помощи сигнальной

библиотеки сделать этот коэффициент переменным в зависимости от времени симуляции или координаты пятна контакта.

Модель дифференциала описывает связь угловых скоростей входов и полуосей следующим выражением:

$$w = \frac{1}{2}(w_1 - w_2) - w_p, \quad (11)$$

где w — угловая скорость входа, (об/мин); w_1 и w_2 — угловые скорости полуосей, (об/мин); w_p — угловая скорость корпуса, (об/мин).

В качестве модели электроприводов используется математическая модель синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, управление приводами — векторное [5].

Модель батареи основана на модели литиевой аккумуляторной ячейки. Зарядно-разрядная характеристика

ячейки получена экспериментальным путём. Составной частью модели батареи является модель контроля изоляции [6].

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС

Проект (1), реализованный на аппаратно-программируемом комплексе (рис. 5), состоит из:

- 1) модели транспортного средства;
- 2) скрипта, имитирующего логику запуска компонентов высоковольтной системы (Батарея, Инверторы, Преобразователи), *C*-код;
- 3) имитатора *CAN*-шин, реализованного с помощью штатного ПО АПК;
- 4) блока настроек аппаратных модулей ввода-вывода АПК;
- 5) модели расчёта ограничений для моделей приводов и батареи, выполненной в среде *Simulink*;
- 6) модели водителя (управление педалями акселератора и тормоза, рулевой колодкой, терминалами питания и зажигания, селектором, а также возможность движения ТС по выбранному циклу движения — *WLTC*, *NEDC*, *FTP*, *ECE*), выполненной в среде *Simulink*.

Скомпилированный проект (1), включающий модель ТС (2), интегрируется в компьютер реального времени стенда (3). Коммуникация с блоком управления (4), в котором реализован испытуемый алгоритм (5), выполнена посредством электрического жгута, ответная часть которого подключена к «коробке прерываний» или *Breakout Box* (6), являющейся концентратором электрической проводки и предоставляющей пользователю

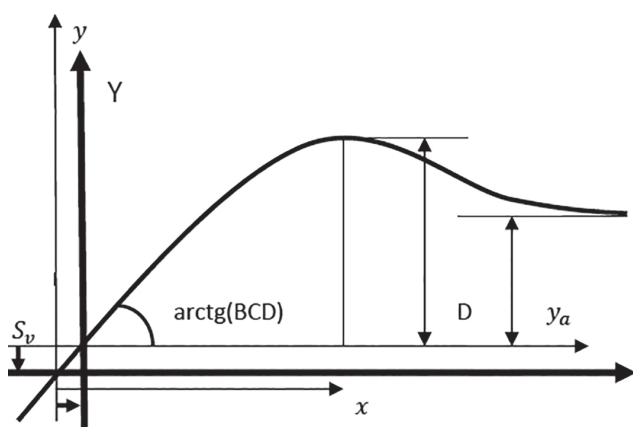


Рис. 4. Общий вид кривой магической формулы.

Fig. 4. Main view of the "Magic formula" curve.

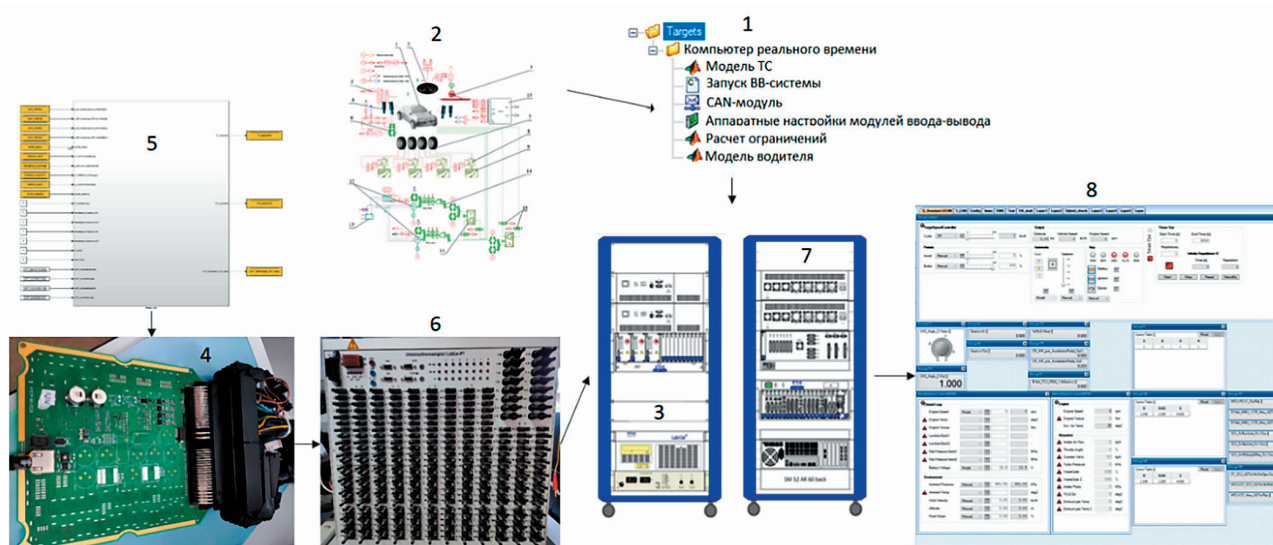


Рис. 5. Структура АПК-стенда.

Fig. 5. Architecture of the HiL test bench.

возможность проводить необходимые электрические разрывы и измерения благодаря коммуникации с лицевой частью устройства. «Коробка прерываний» подключена к аппаратным выводам стенда (7) — модулям ввода-вывода, способных принимать и генерировать цифро-аналоговые и аналогово-цифровые сигналы, высокочастотные ШИМ-сигналы (до 100 кГц), имитировать и обрабатывать CAN-сообщения. Управление ходом эксперимента выполняется посредством взаимодействия с графической средой — средой эксперимента (8).

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Проверка работы разработанного модельного комплекса выполнена относительно натурных испытаний прототипа на испытательном полигоне для продольной и поперечной динамики. С целью соответствия натурному испытанию оператором устанавливаются в качестве входных воздействий положение селектора, управление педалями тормоза и газа (%), рулевое управление (°), напряжение источника питания (В), коэффициент сцепления с дорожным полотном — сигналы, записанные на прототипе с помощью логгера данных. Выходными параметрами являются скорость ТС (км/ч), крутящий момент каждого привода (Нм), частота вращения ротора (об/мин), боковое ускорение ТС (g), скорость рыскания (град/сек). В качестве критерия точности результатов используется среднеквадратичное отклонение, вычисленное по формуле [7]:

$$S_0 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (12)$$

где N — объём выборки; i — номер выборки; x_i — элемент выборки или числовое значение на i -ом шаге:

$$x_i = a_{xi}^{\text{модель}} - a_{xi}^{\text{экспер}}, \quad (13)$$

\bar{x} — нормированная среднеарифметическая ошибка.

Заезд по циклу WLTC

Испытания по стандартизированным циклам движения предоставляют ценную информацию о характеристиках транспортного средства, а также эффективности работы систем прототипа [8]. Цикл WLTC является всемирным гармонизированным тестовым циклом для легковых автомобилей. Цикл разделён непродолжительными остановками на 4 фазы: разгон ТС до 56,5 км/ч, до 76,6 км/ч, до 97,4 км/ч, до 131,6 км/ч.

Рассчитанная погрешность относительно результатов моделирования и натурных испытаний составила:

- 1) скорость ТС=2,1%;
- 2) частота вращения ротора — 2,1%;
- 3) крутящий момент на переднем электродвигателе — 0,6%;
- 4) крутящий момент на заднем электродвигателе — 1,05%.

Манёвр «переставка» с низким коэффициентом сцепления

Скоростной объезд препятствия с последующим возвращением на прежний курс. Коэффициент сцепления с дорожным полотном — 0,4.

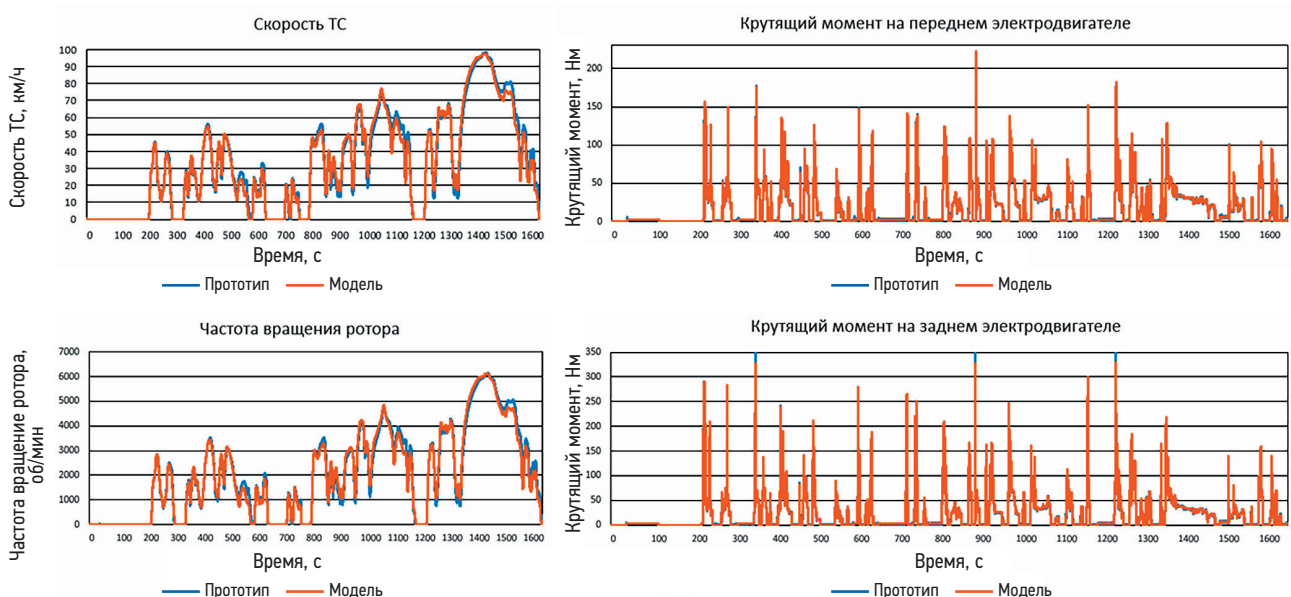


Рис. 6. Сравнение результатов по циклу WLTC.

Fig. 6. The WLTC cycle results comparison.

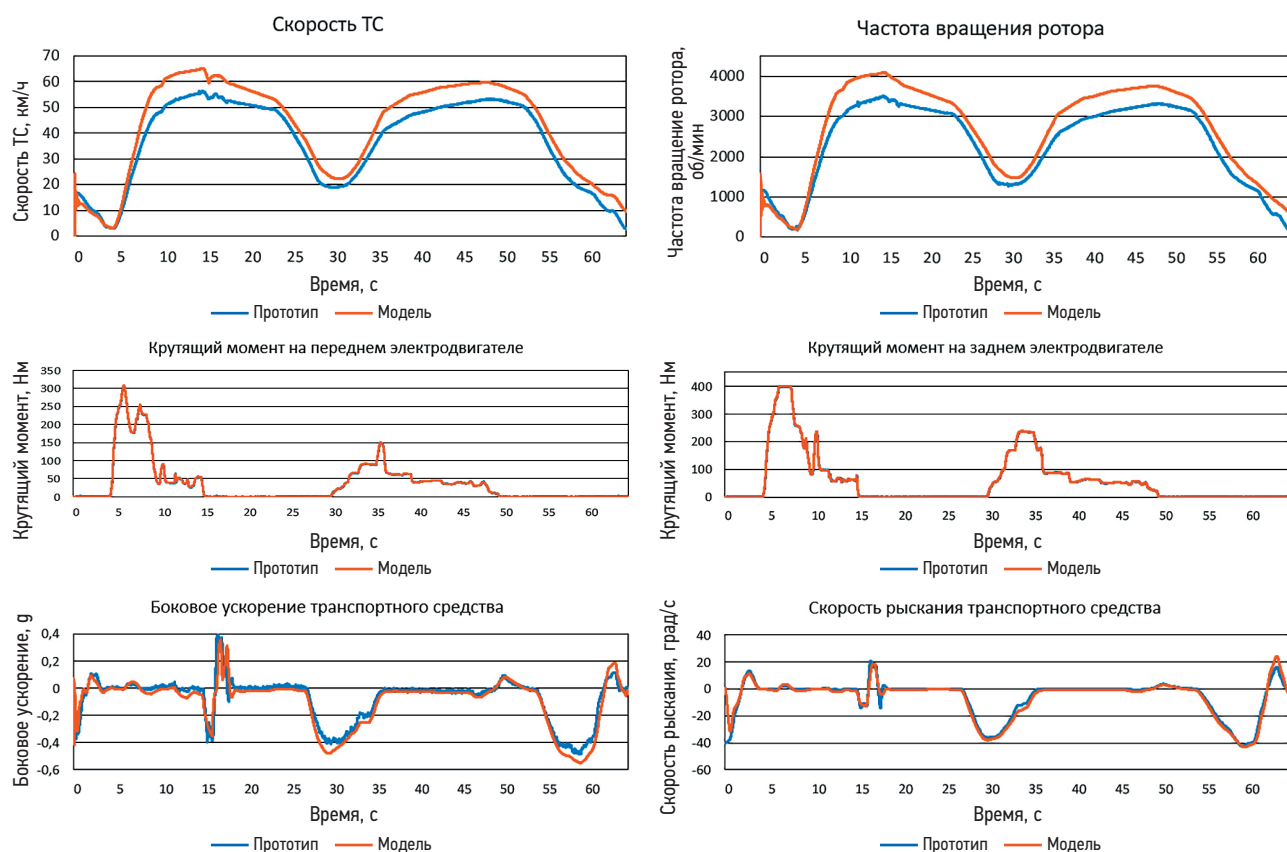


Рис. 7. Сравнение результатов по манёвру «переставка» с низким коэффициентом сцепления.

Fig. 7. The comparison of results of the “single lane change” maneuver with low friction coefficient.

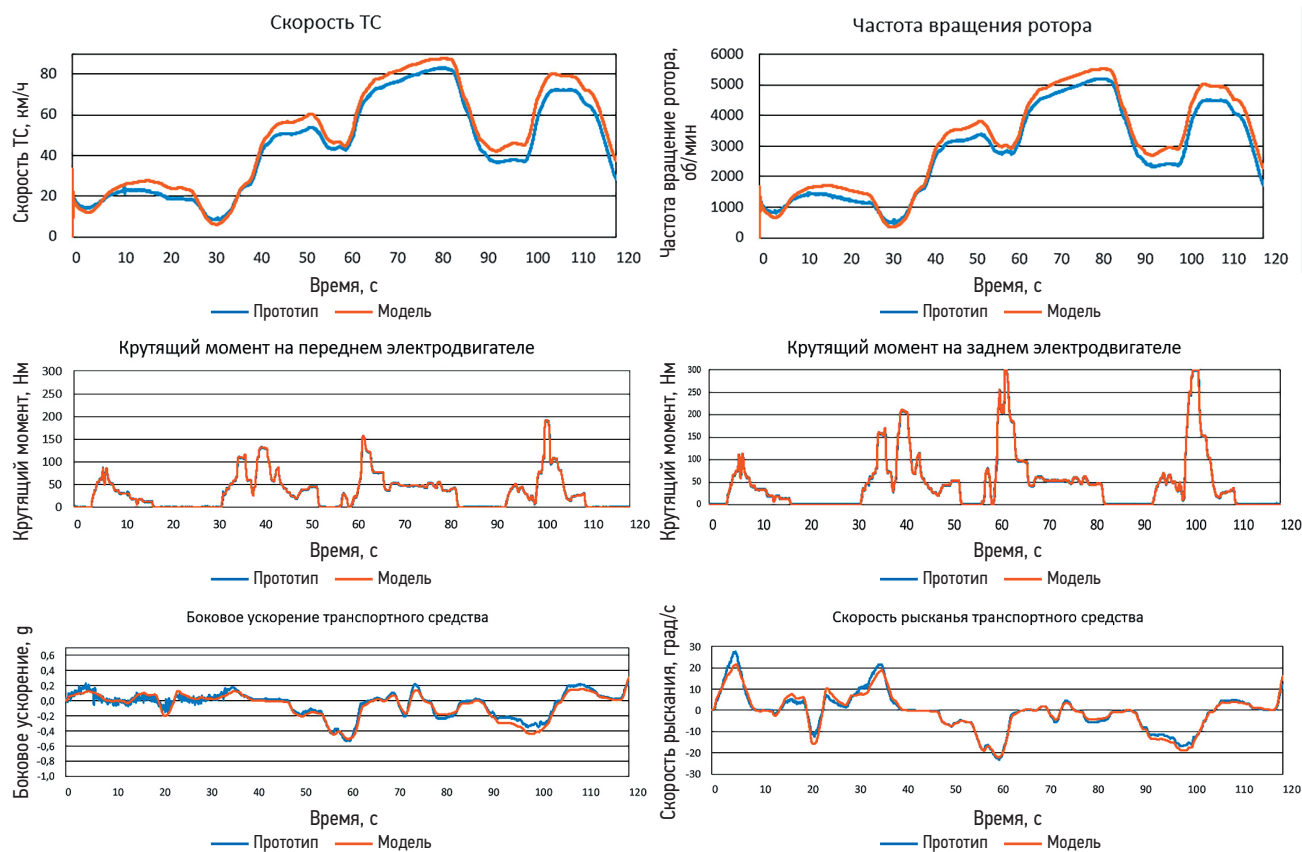


Рис. 8. Сравнение результатов по движению по периметру автодрома с переменной скоростью.

Fig. 8. The comparison of results of moving around the testing track with variable velocity.

Рассчитанная погрешность относительно результатов моделирования и натурных испытаний составила:

- 1) скорость ТС=2,1%;
- 2) частота вращения ротора — 2,1%;
- 3) крутящий момент на переднем электродвигателе — 0,6%;
- 4) крутящий момент на заднем электродвигателе — 0,5%;
- 5) боковое ускорение транспортного средства — 7,3%;
- 6) скорость рыскания транспортного средства — 4,9%.

Движение по периметру автодрома с переменной скоростью до 80 км/ч

Рассчитанная погрешность относительно результатов моделирования и натурных испытаний составила:

- 1) скорость ТС=4,3%;
- 2) частота вращения ротора — 4,4%;
- 3) крутящий момент на переднем электродвигателе — 3,2%;
- 4) крутящий момент на заднем электродвигателе — 3,3%;
- 5) боковое ускорение транспортного средства — 6,4%;
- 6) скорость рыскания транспортного средства — 6,2%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модельный комплекс разработан в средах *Simcenter Amesim* и *Matlab Simulink*, а также реализован на компьютере реального времени аппаратно-программируемого комплекса.

На основе результатов испытаний созданного комплекса можно сделать вывод, что разработанный модельный комплекс подходит для достижения целей моделирования, в том числе для исследования, отладки и первичных калибровок алгоритма распределения крутящего момента по ведущим осям полноприводного электрического транспортного средства. Погрешности при моделировании режимов работы,

соответствующих продольной и поперечной динамике прототипа, не превышают 7,5%, что соответствует целям моделирования.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. М.Д. Мизин — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; А.Н. Малышев — редактирование текста рукописи; А.М. Заватский — редактирование текста рукописи, создание изображений; В.В. Дебелов — экспертная оценка, утверждение финальной версии. 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 публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. M.D. Mizin — search for publications, writing the text of the manuscript; A.N. Malyshev — editing the text of the manuscript; A.M. Zavatsky — editing the text of the manuscript, creating images; V.V. Debelov — expert opinion, approval of the final version. 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. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nibert J., Herniter M.E., Chambers Z. Model-Based System Design for MIL, SIL, and HIL // *World Electr. Veh. J.* 2012. Vol. 5, N 4. P. 1121–1130. doi: 10.3390/wevj5041121
2. Хусаинов А.Ш. Эксплуатационные свойства автомобиля: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ. 2011.
3. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин: учебник. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.
4. Pesejka H.B. Tyre and Vehicle Dynamics. Elsevier Ltd, 2012. doi: 10.1016/C2010-0-68548-8
5. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). М.: МЭИ, 2013.
6. Малышев А.Н., Груненков Е.А., Дебелов В.В., и др. Имитационное моделирование системы контроля изоляции высоковольтной электросети транспортного средства с гибридной силовой установкой // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2021. Т. 15, № 2. С. 36–50. doi: 10.31992/2074-0530-2021-48-2-36-50
7. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1971.
8. Poon J.J., Kinsy M.A., Pallo N.A., et al. Hardware-in-the-Loop Testing for Electric Vehicle Drive Applications // 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Orlando: IEEE, 2012. doi: 10.1109/APEC.2012.6166186

REFERENCES

1. Nibert J, Herniter ME, Chambers Z. Model-Based System Design for MIL, SIL, and HIL. *World Electr. Veh. J.* 2012;5(4):1121–1130. doi: 10.3390/wevj5041121
2. Husainov A.Sh. *Ekspluatatsionnye svoystva avtomobilya: uchebnoe posobie*. Ul'janovsk, UGTU, 2011.
3. Larin VV. *Theory of movement of all-wheel drive wheeled vehicles: a textbook*. Moscow: MG TU im NE Bauman, 2010.
4. Pasejka HB. *Tyre and Vehicle Dynamics*. Elsevier Ltd; 2012. doi: 10.1016/C2010-0-68548-8
5. Kalachev YuN. *Vector regulation (practice notes)*. Moscow: MEI; 2013. (In Russ.).
6. Malyshev A.N, Grunenkov Ye.A, Debelov V.V, et al. Simulation of the insulation monitoring system of the high-voltage electrical network of a vehicle with a hybrid power plant. *Izvestiya MG TU MAMI*. 2021; 15(2); 36–50. doi: 10.31992/2074-0530-2021-48-2-36-50
7. Bendat J, Pearsol A. *Measurement and analysis of random processes*. Moscow: Mir; 1971. (In Russ.).
8. Poon JJ, Kinsy MA, Pallo NA, et al. Hardware-in-the-Loop Testing for Electric Vehicle Drive Applications. In: *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. Orlando: IEEE; 2012. doi: 10.1109/APEC.2012.6166186

ОБ АВТОРАХ

* Мизин Максим Дмитриевич,

заведующий сектором лабораторных калибровочных работ высоковольтных систем;
адрес: Российская Федерация, 125438, Москва,
ул. Автомоторная д. 2;
ORCID: 0009-0008-5097-0861;
eLibrary SPIN: 2110-3762;
e-mail: maxim.mizin@nami.ru

Малышев Андрей Николаевич,

заведующий отделом калибровочных работ гибридных транспортных средств;
ORCID: 0000-0003-0233-0348;
eLibrary SPIN: 6196-3162;
e-mail: andrey.malyshev@nami.ru

Заватский Александр Михайлович,

инженер-конструктор отдела калибровочных работ гибридных транспортных средств;
ORCID: 0000-0003-0616-1350;
eLibrary SPIN: 9509-1069;
e-mail: aleksandr.zavatskiy@nami.ru

Дебелов Владимир Валентинович,

канд. техн. наук,
заведующий отделом технологии программного обеспечения;
ORCID: 0000-0001-6050-0419;
eLibrary SPIN: 8701-7410;
e-mail: vladimir.debelov@nami.ru

AUTHORS' INFO

* Maxim D. Mizin,

Head of Laboratory Calibration Section of High Voltage Systems;
address: 2 Avtomotornaya street, 125438 Moscow, Russian Federation;
ORCID: 0009-0008-5097-0861;
eLibrary SPIN: 2110-3762;
e-mail: maxim.mizin@nami.ru

Andrey N. Malyshev,

Head of the Hybrid Vehicle Calibrations Department;
ORCID: 0000-0003-0233-0348;
eLibrary SPIN: 6196-3162;
e-mail: andrey.malyshev@nami.ru

Alexander M. Zavatsky,

Design Engineer of the Hybrid Vehicle Calibrations Department;
ORCID: 0000-0003-0616-1350;
eLibrary SPIN: 9509-1069;
e-mail: aleksandr.zavatskiy@nami.ru

Vladimir V. Debelov,

Cand. Sci. (Tech.),
Head of the Software Technologies Department;
ORCID: 0000-0001-6050-0419;
eLibrary SPIN: 8701-7410;
e-mail: vladimir.debelov@nami.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author