МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

УДК 629.3

И.А. КУЛИКОВ, канд. техн. наук
ведущий инженер-исследователь[1]
E-mail: i.kulikov.mami@gmail.com

И.А. ФИСЕНКО, канд. техн. наук
ведущий эксперт Экспертного совета[1]
E-mail: fisenko@nami.ru

[1]ФГУП «НАМИ», г. Москва, Российская Федерация

Поступила в редакцию 29.05.2025.

СИСТЕМА ПОЛУНАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК АВТОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ АРХИТЕКТУРЫ COMPONENT-IN-THE-LOOP С ВИРТУАЛЬНОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

В статье предложена и верифицирована концепция системы типа Component-in-the-Loop (CiL), предназначенной для лабораторных виртуально-физических испытаний автомобильных комбинированных (гибридных) энергоустановок (КЭУ). Особенностью концепции является модульная архитектура с унифицированными способами взаимодействия между физической и виртуальной частями системы, а также между виртуальными компонентами. Основу виртуальной части CiL-системы составляет модель трансмиссии, тип которой может быть выбран в зависимости от схемы исследуемой энергоустановки. Взаимодействуя с установленными на стенде силовыми агрегатами посредством динамометров, модель согласует их нагрузочные режимы в соответствии с имитируемыми режимами функционирования КЭУ и движения автомобиля. Данный подход позволяет строить масштабируемые CiL-системы для энергоустановок с произвольным числом агрегатов. Верификация концепции выполнена посредством вычислительных экспериментов с математической моделью CiL-системы на основе КЭУ Toyota Hybrid System с двухпоточной бесступенчатой трансмиссией. Результаты моделирования показывают, что CiL-система адекватно воспроизводит работу КЭУ в заданных режимах движения автомобиля, а ее управляющая структура функционирует в соответствии с заложенными принципами и является устойчивой.

Ключевые слова: *виртуально-физические испытания, Component-in-the-Loop, комбинированные энергоустановки автомобилей, математическое моделирование, виртуальная трансмиссия, вычислительные эксперименты*

DOI: https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-3-72-27-36

Введение. Технология виртуально-физических испытаний является востребованным и развитым средством разработки и исследования автомобильных энергоустановок и их компонентов [1]. Разновидность этой технологии, называемая Component-in-the-Loop (с англ. «компонент в замкнутом контуре»), подразумевает физическую реализацию энергоустановки или некоторой части ее агрегатов в стендовом исполнении и виртуальную реализацию автомобиля, а также агрегатов, отсутствующих в физической части системы. Между аппаратными и виртуальными компонентами устанавливаются двухсторонние связи в форме физического взаимодействия и информационного обмена. Физическое взаимодействие происходит между испытываемыми агрегатами и нагружаю-

щими устройствами-динамометрами, выполняющими роль силового интерфейса между программной и аппаратной частями системы. По сравнению с традиционным методом стендовых испытаний с механической имитацией инерции автомобиля управление динамометрами посредством виртуальных моделей обладает значительными преимуществами: позволяет воспроизводить инерционные нагрузки без использования маховиков, в том числе с имитацией независимого движения вращающихся масс (колес) и массы автомобиля со связью через проскальзывание шин, что дает возможность моделировать работу силового привода в условиях ограниченного сцепления шин с дорогой при прямолинейном или траекторном движении автомобиля.

Первые описания систем типа CiL, предназначенных для испытаний силовых агрегатов автомобилей, можно найти в патентах, опубликованных в конце 1970-х и в 1980-х годах. В частности, в [2] описана установка для стендовых испытаний, в которой моделирование массы транспортного средства выполняется посредством динамометра с замкнутой системой управления, включающей математическую модель движения автомобиля, реализованную с помощью аналоговых вычислительных машин. В патенте фирмы General Motors [3] для управления нагрузкой двигательного стенда использован тот же принцип «виртуальной инерции» в комбинации с моделью, которая включает автоматическую трансмиссию с гидротрансформатором и планетарной коробкой передач, а также регулятор скорости виртуального автомобиля, выполняющий ездовые циклы посредством управления топливоподачей испытываемого двигателя. Дальнейшее развитие этого подхода сформировало одно из направлений CiL-технологии, называемое Engine-in-the-Loop [4–6]. В последующих разработках виртуальная инерция автомобиля и компоненты виртуальной силовой установки использовались в CiL-системах, предназначенных для испытаний традиционных, гибридных [7–11] и электрических [12–15] энергоустановок.

В связи с использованием силового агрегата в функциях индивидуального контроля тяговых и тормозных усилий появились модификации систем CiL, воспроизводящие движение автомобиля по дорогам с ограниченным сцеплением шин, а также траекторные маневры. Помимо виртуальной инерции в этих системах реализуются различные подходы к моделированию проскальзывания колес. Например, в патенте [16] фирмы Horiba описана система, в которой сигнал задания частоты вращения вала динамометра определяется суммой скорости виртуального автомобиля и скорости продольного проскальзывания шины. Проскальзывание рассчитывается упрощенно, без моделирования вращательной динамики колес. В патенте [17] фирм AVL и Porsche представлен метод управления CiL-системой, в котором математическая модель шины используется в качестве регулятора для нагружающего устройства, соединенного с испытываемым агрегатом. Этот подход приближает функционирование CiL-системы к физике моделируемого процесса, но при этом предъявляет высокие требования к точности используемого измерительного и управляющего оборудования, поскольку для расчета проскальзывания шины в нем непосредственно используется сигнал датчика угловой скорости вала нагружающего устройства, а управление нагрузкой осуществляется без обратной связи с моделью.

CiL-система с аналогичной функциональностью, но без перечисленных недостатков, была разработана во ФГУП «НАМИ» для испытаний прототипа КЭУ, предназначенной для грузовых автомобилей [18], в которой привод задних колес осуществлялся гибридным агрегатом параллельной схемы, а привод передних колес выполнен индивидуальным, посредством двух электромашин. Для испытаний КЭУ была создана CiL-система, в которой нагрузочные режимы агрегатов, не имеющих физической связи друг с другом, согласованы через виртуальный автомобиль, включающий модели колес, движение которых характеризуется проскальзыванием (продольным и боковым), определяющим угловые скорости валов испытываемых агрегатов. Также особенностью системы является использование двух контуров обратных связей — силового и кинематического — которые охватывают соответственно виртуальную модель привода колеса и регулятор нагружающего устройства.

Комбинированные энергоустановки, являющиеся одной из наиболее актуальных технологий повышения эффективности автотранспорта, имеют, как правило, сложную архитектуру, в которой трансмиссия является не только ключевым, но и весьма проблематичным элементом, в особенности когда речь идет о макетировании новых энергоустановок с экспериментальным сравнением различных схем КЭУ, конструкции которых определяются типами применяемых трансмиссий. Использование серийных автоматических коробок передач (АКП) для макетирования не представляется возможным, поскольку современные АКП работают только с «авторизованными» агрегатами автомобиля, а их контроллеры защищены от вмешательств. Разработка новой системы управления АКП представляет собой отдельную задачу, не менее (а, возможно, и более) сложную, чем разработка системы управления для КЭУ. Создание нескольких вариантов новых трансмиссий для макетирования КЭУ является, очевидно, нецелесообразным решением, особенно ввиду того, что для реализации в итоге будет выбран только один вариант.

Использование технологии CiL в качестве основы для системы испытаний макетных образцов КЭУ позволяет решить описанную проблему. Для этого системообразующим элементом CiL-архитектуры должна быть виртуальная трансмиссия, являющаяся связующим звеном и средством взаимодействия между аппаратными компонентами КЭУ (ДВС, электромашины) и виртуальным автомобилем. Способ организации взаимодействий должен быть достаточно универсальным, чтобы позволять реализовывать систему на основе различных типов трансмиссий (ступенчатые с разрывом и без разрыва потока мощности, бесступенчатые, многопоточные [19]), и подходить для многокомпонентных КЭУ, включающих два электропривода и более. В настоящей работе представлена концепция CiL-архитектуры, соответствующей перечисленным требованиям. Верификация концепции проиллюстрирована посредством математического моделирования.

Концепция CiL-системы для многокомпонентных КЭУ на основе виртуальной трансмиссии. Основой для построения CiL-архитектуры являются способы взаимодействия между физической и виртуальной частями системы и между компонентами виртуальной модели. Оба способа позволяют формировать функционально-законченные виртуально-физические и виртуальные модули, которые через унифицированные интерфейсы соединяются в общую архитектуру. На рисунке 1 показана блок-схема, иллюстрирующая структуру базовых модулей CiL-системы, а также взаимодействия между модулями и их компонентами.

Виртуально-физический модуль можно рассматривать как модель силового привода, движущая часть которого (силовой агрегат) является физическим объектом, а нагружающая (например, колесо) — виртуальным. Между ними может располагаться трансмиссия, частично виртуальная, частично физическая. На рисунке 1 виртуальная часть модуля представлена блоком «Модель-1». Чтобы «соединить» части привода друг с другом необходимо включить их в замкнутый контур взаимодействий двух типов: физического и информационного. Интерфейсами для осуществления этих взаимодействий являются соответственно нагружающее устройство, соединенное с силовым агрегатом, и расположенный между ними датчик крутящего момента и частоты вращения. Когда силовой агрегат приводит вал во вращение, значение измеренной угловой скорости $\omega^{изм}$ отклоняется от угловой скорости виртуальной части привода $\omega^{мод1}$. Разность этих скоростей передается в регулятор, который формирует компенсирующую команду-уставку $T^{уст}$, исполняемую нагружающим устройством. В результате на валу создается крутящий момент, который измеряется датчиком и в виде сигнала $T^{изм}$ отправляется в виртуальную часть, приводя ее в движение. Таким образом, виртуально-физический модуль CiL-системы основан на двух контурах управления: силовом и кинематическом.

«Модель-1» является общим компонентом виртуально-физического и виртуального модулей. Последний может также включать модели, которые не взаимодействуют напрямую с аппаратными компонентами системы, например «Модель-2» (см. рисунок 1). «Модель-1» и «Модель-2» можно рассматривать как подструктуры, на которые разделена виртуальная составляющая объекта испытаний, или как элементарные блоки, которые представляют некоторую часть совокупности моделей, формирующих виртуальный объект. Для организации взаимодействий между ними используется метод графов связей (bond graphs) [20]. При реализации математической модели в программной среде он обеспечивает удобство ее дискретизации с разделением на функционально-законченные элементы, обменивающиеся унифицированными сигналами [21]. Передача сигналов осуществляется в двух направлениях: от источника движения к нагрузке и обратно. В прямом направлении передаются переменные типа потенциала, которыми в механических системах вращательного действия являются крутящие моменты ($T^{мод1}$ в случае модели

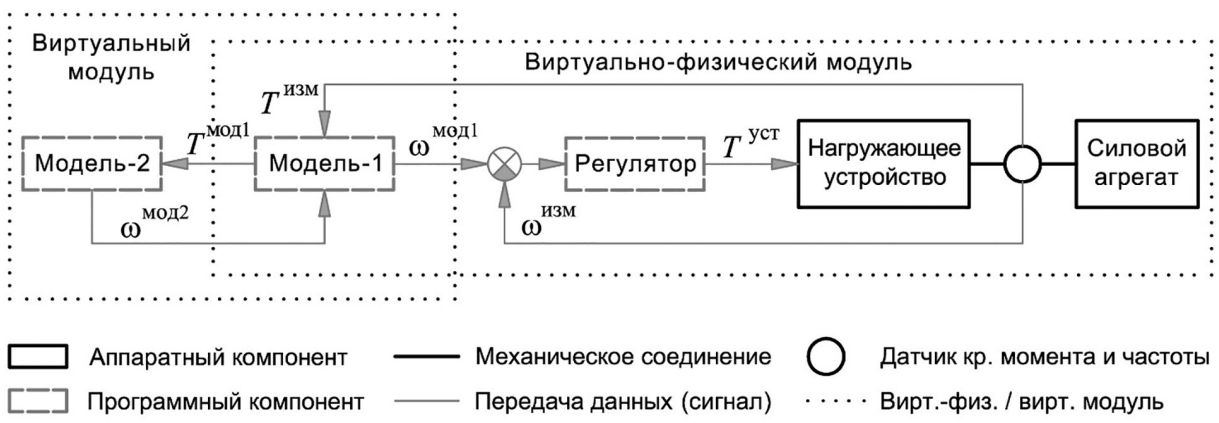


Рисунок 1 — Структурно-функциональная схема модульной CiL-системы
Figure 1 — Structure and operating loops of a modular CiL system

на рисунке 1). В обратном направлении передаются переменные типа потока — угловые скорости $\omega^{мод2}$*. Можно отметить, что хотя физически крутящий момент $T^{изм}$, измеряемый датчиком на валу силового агрегата, передается по обратной связи, для «Модели-1» он является источником движения, и его действие будет передаваться в прямом направлении к «Модели-2», тем самым соответствуя общему принципу обмена сигналами в виртуальной части системы.

Компоненты виртуального модуля могут быть достаточно сложными моделями с несколькими силовыми воздействиями, поступающими на их входы. В частности, «Модель-1» может представлять трансмиссию КЭУ, к которой подсоединены силовые агрегаты гибридного привода — ДВС и электромашины. Каждый из них создает крутящий момент, измеренное значение которого поступает на соответствующий вход (вал) виртуальной трансмиссии. Стандартизированные интерфейсы между физической и виртуальной частями CiL-системы позволяют создавать масштабируемую архитектуру, которая обеспечивает возможность подключения произвольного числа силовых агрегатов и, таким образом, подходит для макетирования многокомпонентных КЭУ. «Модель-2» может являться виртуальным автомобилем, на силовые входы которого (т. е. на колеса) поступают крутящие моменты $T_к$ от приводных валов виртуальной трансмиссии, а на выходах рассчитываются угловые скорости колес $\omega_к$, передаваемые обратно в трансмиссию. Сформированная таким образом архитектура CiL-системы представлена на рисунке 2 на примере КЭУ с двумя электромашинами ЭМ1 и ЭМ2, условные обозначения аналогичны рисунку 1, обозначения переменных виртуально-физических модулей опущены.

Для выполнения испытаний система снабжается генератором сигналов управления КЭУ, который на схеме назван виртуальным водителем. В частности, он выполняет ездовые циклы, компенсируя отклонение скорости виртуального автомобиля $v_а$ от значения, задаваемого программой цикла. Для этого модель водителя формирует сигналы акселератора и тормоза, которые поступают на входы аппаратного контроллера КЭУ, раздающего команды силовым агрегатам в соответствии с заложенным в него алгоритмом управления.

Верификация концепции CiL-системы. Верификация представленной концепции выполнена путем математического моделирования CiL-системы. Разработанная модель состоит из трех основных частей, описываемых ниже: стенда с силовыми агрегатами и нагружающими устройствами, виртуальной трансмиссии и виртуального автомобиля. Кроме того, в систему входят модель водителя в виде регулятора скорости и модель контроллера КЭУ.

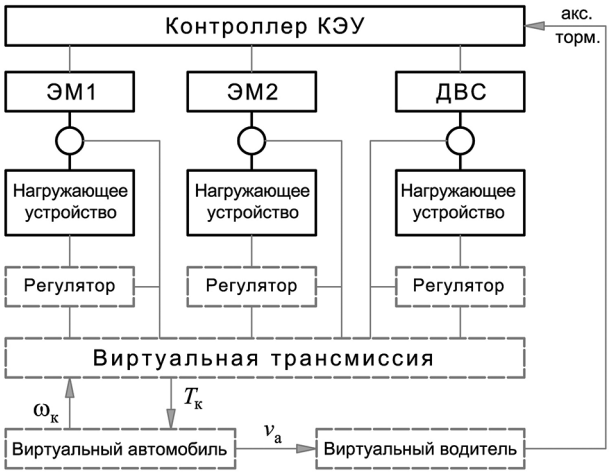


Рисунок 2 — Архитектура CiL-системы для испытаний многокомпонентной КЭУ с использованием виртуальной трансмиссии
Figure 2 — CiL architecture with virtual transmission intended to test complex hybrid powertrains

В качестве репрезентативного образца КЭУ была выбрана Toyota Hybrid System (THS), трансмиссия которой взаимодействует с тремя агрегатами: ДВС и двумя электроприводами. Взаимодействие представляет интерес своими функциональными режимами, которые включают бесступенчатое регулирование кинематического и силового передаточных чисел, разделение потока мощности ДВС в понижающем диапазоне регулирования и циркуляцию мощности в повышающем диапазоне.

Математические модели. Испытательный стенд представлен моделями трех силовых агрегатов, соединенных с нагружающими устройствами (в случае ДВС — через демпфер крутильных колебаний). Каждая из этих моделей описывает две вращающиеся массы — испытываемого агрегата и нагружающего устройства, — соединенные упругодемпфирующим валом, на котором установлен датчик крутящего момента и угловой скорости (датчик считается «идеальным» — бесконтактным). Динамика данной системы описывается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} J_д \dot{\omega}_д = T_д^{net} - T_{вал}, \\ J_н \dot{\omega}_н = T_{вал} + T_н, \\ \dot{T}_{вал} = c_{вал}\left(\omega_д - \omega_н\right) + d_{вал}\left(\dot{\omega}_д - \dot{\omega}_н\right), \\ T_д^{изм} = T_{вал}, \quad \omega_д^{изм} = \omega_д, \end{cases} \tag{1}$$

где $J_д$, $J_н$ — моменты инерции силового агрегата и нагружающего устройства соответственно; $\omega_д$, $\omega_н$ — угловые скорости валов силового агрегата и нагружающего устройства; $T_д^{net}$ — крутящий момент, создаваемый силовым агрегатом (момент «нетто», без инерционной составляющей); $T_н$ —

*Исключение составляют упругодемпфирующие звенья, образующие соединения, в которых переменные типа потока и потенциала передаются и в прямом, и в обратном направлениях.

момент, создаваемый нагружающим устройством; $T_{вал}$ — крутящий момент на валу, соединяющем силовой агрегат и нагружающее устройство; $c_{вал}$, $d_{вал}$ — крутильная жесткость вала и коэффициент демпфирования угловых колебаний соответственно; $T_д^{изм}$ — крутящий момент силового агрегата (включающий инерционную составляющую), «измеренный» датчиком на валу; $\omega_д^{изм}$ — «измеренная» угловая скорость вала силового агрегата.

На рисунке 3 показаны схемы КЭУ THS на примере системы 3-го поколения [22]. Схема на рисунке 3 *a* демонстрирует основные компоненты КЭУ и связи между ними. Центральным элементом силового привода является планетарная трансмиссия, со звеньями которой соединены валы ДВС и электромашин. Электроприводы ЭМ1, ЭМ2 и тяговая батарея связаны друг с другом электрически — звеном постоянного тока, обозначенным на рисунке пунктирной линией.

На рисунке 3 *b* показана расчетная схема планетарной трансмиссии с инерционными элементами, соответствующими соединенным с ней агрегатам, и направлениями крутящих моментов, обозначенными стрелками. Расшифровка обозначений переменных и параметров приведена ниже, в описании модели. Центральным элементом трансмиссии является планетарный ряд, осуществляющий разделение мощности. ДВС соединен с его водилом, ЭМ1 — с солнечной шестерней, а электромашина ЭМ2 через планетарный редуктор (с остановленным водилом) соединена с эпициклом, который является выходным звеном трансмиссии. Две степени свободы планетарного ряда и согласованное управление двумя электроприводами формируют

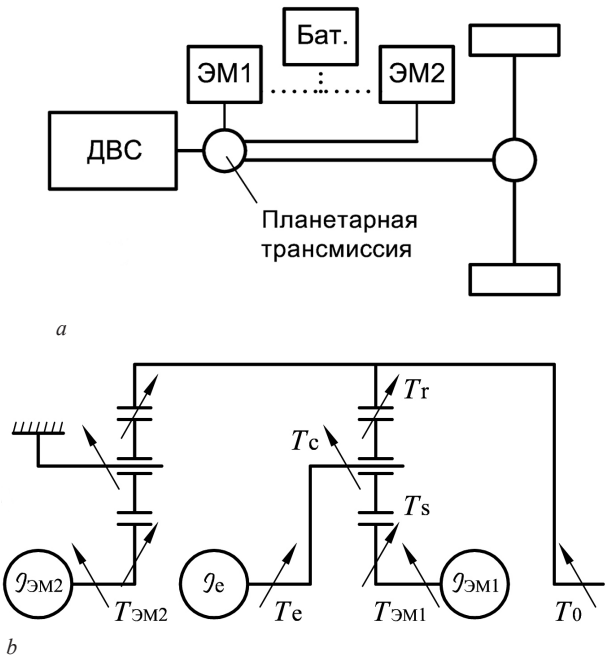


Рисунок 3 — Схемы КЭУ THS: *a* — компонентный состав КЭУ; *b* — расчетная схема планетарной трансмиссии
Figure 3 — Schematics of Toyota Hybrid System: *a* — main components; *b* — torque diagram of the planetary transmission

двухпоточную бесступенчатую трансмиссию, которая позволяет регулировать частоту вращения вала ДВС независимо от скорости автомобиля.

При моделировании планетарного ряда, разделяющего мощность, было учтено то, что датчик, установленный между ЭМ1 и нагружающим устройством, выдает сигнал крутящего момента, не требующий учета инерции ЭМ1 в модели (см. обоснование в [18]). Вследствие этого единственный связанный с ЭМ1 инерционный элемент, который должен быть отражен в модели, — это солнечная шестерня. Малая величина инерции солнечной шестерни позволяет не учитывать изменение ее инерционного момента на текущем временном шаге, а рассчитывать его по данным предыдущего шага. Таким образом, вместо интегрирования уравнения вращения солнечной шестерни решается обратная задача динамики: крутящий момент на шестерне рассчитывается как сумма текущего момента ЭМ1 и предыдущего значения инерционного момента с учетом их направлений (знаков). После этого моменты на двух других звеньях планетарного ряда могут быть определены посредством известных соотношений [23]. Угловая скорость солнечной шестерни определяется из уравнения Виллиса с использованием угловых скоростей двух других звеньев — водила и эпицикла, — которые рассчитываются при решении дифференциальных уравнений, описывающих вращение этих звеньев. Вследствие этого нет необходимости вводить упругодемпфирующее звено в модель планетарного ряда для создания в нем двух степеней свободы. Этот прием также упрощает численное решение модели, поскольку исключает из нее дифференциальное уравнение с малым параметром инерции, снижая «жесткость» модели, что особенно полезно для обсчета в реальном времени с ограничением на минимальный временной шаг. С учетом принятых допущений модель динамики виртуальной трансмиссии может быть представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} J_c \dot{\omega}_{c(e)} = T_e^{изм} + T_c, \\ T_s = -\left(T_{ЭМ1}^{изм} - J_s \dot{\omega}_{s(ЭМ1)}\right), \\ T_c = -T_s \left(k+1\right) \eta_{внеш}^{\operatorname{sgn}\left(-T_c \omega_{c(e)}\right)}, \\ T_r = -T_c k / \left(k+1\right) \eta_{внутр}^{\operatorname{sgn}(T_r)}, \\ T_0 = T_r + \left(T_{ЭМ2}^{изм} - J_r \dot{\omega}_{r(ЭМ2)}\right) u_{ред} \eta_{ред}^{\operatorname{sgn}(-T_{ЭМ2})}, \\ \omega_{s(ЭМ1)} = \omega_{c(e)} \left(k+1\right) - k\left(\omega_{r(ЭМ2)} / u_{ред}\right), \\ \omega_{r(ЭМ2)} = v_a u_0 u_{ред} / r, \end{cases} \quad (2)$$

где s, c, r — индексы, обозначающие солнечную шестерню, водило и эпицикл соответственно; $\omega_{c(e)}$, $\omega_{s(ЭМ1)}$, $\omega_{r(ЭМ2)}$ — угловые скорости валов ДВС

и электромашин, а также соединенных с ними звеньев планетарного ряда; $T_{\text{e}}^{\text{изм}}$, $T_{\text{ЭМ1}}^{\text{изм}}$, $T_{\text{ЭМ2}}^{\text{изм}}$ — крутящие моменты ДВС и электромашин, измеренные датчиками; J_{s}, J_{c}, J_{r} — моменты инерции звеньев планетарного ряда; T_{s}, T_{c}, T_{r} — крутящие моменты на звеньях планетарного ряда; k — конструктивный параметр планетарного ряда, равный отношению чисел зубьев эпициклической и солнечной шестерен; $\eta_{\text{внутр}}^{\text{sgn}(T_{\text{r}})}$ — КПД зацепления с внутренним зубом (зацепление сателлитов с эпициклом) с учетом направления крутящего момента на эпицикле; $\eta_{\text{внеш}}^{\text{sgn}\left(-T_{\text{c}}\omega_{\text{c(e)}}\right)}$ — КПД зацепления с внешним зубом (зацепление сателлитов с солнечной шестерней) с учетом знака мощности, которая передается между водилом и солнечной шестерней; T_0 — крутящий момент на выходе планетарной трансмиссии; $u_{\text{ред}}$, $\eta_{\text{ред}}^{\text{sgn}(-T_{\text{ЭМ2}})}$ — передаточное число и КПД (с учетом направления передаваемого момента) редуктора электромашины ЭМ2. Пояснения к обозначениям переменных в последнем уравнении системы (2) приведены ниже.

При моделировании динамики автомобиля рассматривается его прямолинейное движение по горизонтальной поверхности. Проскальзывание шин принято пренебрежимо малым на основании того, что репрезентативными режимами движения являются ездовые циклы, характеризующиеся умеренными ускорениями и высоким сцеплением шин дорогой. С учетом этих допущений модель имеет форму следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \left(m_{\text{a}}+4J_{\text{к}}/r^2\right)\dot{v}_{\text{a}}=\left(T_0u_0\eta_0^{\text{sgn}(T_0)}-T_{\text{т}}\right)/r-\left(F_{\text{f}}+F_{\text{w}}\right), \\ F_{\text{f}}=m_{\text{a}}g\left(f_0+k_v v_{\text{a}}^2\right), \\ F_{\text{w}}=0{,}5A\rho c_{\text{x}}v_{\text{a}}^2, \end{cases} \quad (3)$$

где v_{a} — скорость автомобиля; m_{a} — масса автомобиля; $J_{\text{к}}$ — момент инерции колеса; r — радиус колеса; u_0, $\eta_0^{\text{sgn}(T_0)}$ — передаточное число и КПД (с учетом направления передаваемого момента) главной передачи; $T_{\text{т}}$ — суммарный момент тормозных механизмов; F_{f} — сила сопротивления качению шин; F_{w} — сила аэродинамического сопротивления; g – ускорение свободного падения; f_0 — коэффициент сопротивления качению при скорости, близкой к 0; k_v — коэффициент повышения сопротивления качения в зависимости от скорости; A — площадь передней проекции автомобиля; ρ — плотность воздуха; c_{x} — коэффициент аэродинамического сопротивления автомобиля.

При необходимости модель динамики автомобиля может быть усложнена с добавлением наклона дороги, продольного проскальзывания шин, бокового увода колес.

Численное исследование CiL-системы. Вычислительные эксперименты, выполненные для верификации модели CiL-системы, воспроизводили движение автомобиля и работу КЭУ THS в ездовых циклах, включая WLTC, FTP, ARTEMIS. Моделировался легковой автомобиль массой 1500 кг, КЭУ которого включала ДВС мощностью 73 кВт с максимальными крутящим моментом 140 Н·м, ЭМ1 — 50 кВт, 60 Н·м, ЭМ2 — 60 кВт, 200 Н·м. Были заданы следующие основные параметры планетарной трансмиссии: k = 2,6, $u_{\text{ред}}$ = –2,63 (редуктор меняет направление вращения и крутящего момента).

На рисунке 4 показан участок загородного ездового цикла, который дает наглядную картину функционирования моделей аппаратной части CiL-системы, виртуальной трансмиссии и автомобиля.

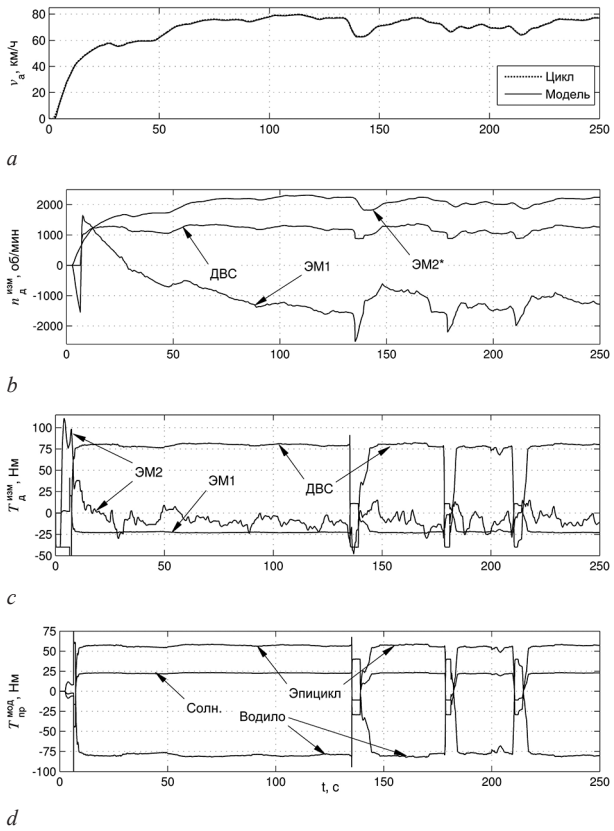


Рисунок 4 — Пример результатов моделирования работы CiL-системы при испытаниях в режиме ездового цикла: v_{a} — скорость автомобиля, задаваемая программой цикла («Цикл») и отработанная регулятором, управляющим скоростью модели автомобиля («Модель»); $n_{\text{д}}^{\text{изм}}$ — частоты вращения валов силовых агрегатов, «измеренные» моделью аппаратной части CiL-системы: ДВС, ЭМ1 и ЭМ2* (* — означает, что частота приведена к выходному валу планетарной трансмиссии через передаточное число редуктора $u_{\text{ред}}$); $T_{\text{д}}^{\text{изм}}$ — крутящие моменты силовых агрегатов, «измеренные» моделью аппаратной части CiL-системы (для согласованности с направлением момента на выходе из планетарной трансмиссии знак момента ЭМ2 инвертирован); $T_{\text{пр}}^{\text{мод}}$ — крутящие моменты на звеньях планетарного ряда-делителя мощности, рассчитанные моделью виртуальной части CiL-системы

Figure 4 — Results of simulating CiL system operation in a driving cycle: v_{a} — vehicle speed required by the driving cycle (“Цикл”) and tracked by the velocity regulator of the virtual vehicle (“Модель”); $n_{\text{д}}^{\text{изм}}$ — rpms “measured” by the models of the CiL system’s sensors at the shafts of the engine (ДВС), and electric drives (ЭМ1, ЭМ2*, where * denotes the rpm translated to the transmission output shaft using the ratio of the reduction gear $u_{\text{ред}}$); $T_{\text{д}}^{\text{изм}}$ — “measured” shaft torques (the torque sign of ЭМ2 electric drive is inverted for consistency with the output torque); $T_{\text{пр}}^{\text{мод}}$ — torques at the elements of the power-split gearset calculated by the model of the transmission

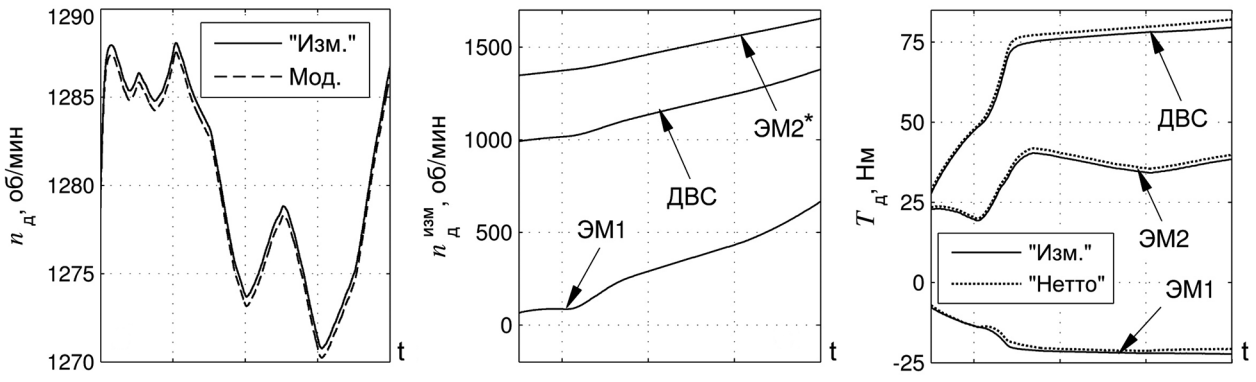
По графикам можно видеть устойчивую работу системы с минимальными отклонениями скорости модели автомобиля от программы ездового цикла. Начало разгона автомобиля происходит в понижающем диапазоне трансмиссии с положительным направлением вращения ЭМ1, что соответствует режиму разделения мощности ДВС. Одна часть мощности передается механическим путем — от водила к эпициклу, а другая — электрическим — от водила на солнечную шестерню, которая нагружается электромашиной ЭМ1, регулирующей посредством этой нагрузки угловую скорость вала ДВС. При положительном направлении вращения ЭМ1 работает в режиме генератора, передавая мощность в ЭМ2 (также возможна зарядка тяговой батареи), которая, в свою очередь, использует эту мощность для создания дополнительного крутящего момента на выходе планетарной трансмиссии. На графике можно видеть, что этот момент положительный (с учетом инвертирования знака редуктором), т. е. он увеличивает силовое передаточное число трансмиссии. При скорости выше 60 км/ч трансмиссия переходит в повышающий диапазон регулирования с отрицательным направлением вращения ЭМ1, что соответствует циркуляции мощности через планетарный ряд и электроприводы. При этом ЭМ1 работает в режиме двигателя, питаясь от привода ЭМ2 (возможен также отбор мощности из тяговой батареи), который для этого работает в режиме генерации, забирая избыточную мощность с выходного вала трансмиссии, тем самым уменьшая ее силовое передаточное число. Наблюдаемая на графиках картина соответствует описаниям режимов работы трансмиссии THS, представленным в отчетах и статьях об исследованиях данной системы [22, 24–26]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что модель CiL-системы адекватно воспроизводит функционирование рассматриваемой КЭУ.

Рисунок 5 демонстрирует работу моделей нагрузочных стендов на примере фрагментов ездового цикла, представленного выше. На поле рисунка 5 *a* показана синхронизация частоты вращения вала ДВС, «измеряемой» моделью стенда («Изм.»), с соответствующей частотой, рассчитываемой моделью трансмиссии (Мод.). Синхронизация выполняется регулятором нагрузки, который управляет моделью динамометра. По графикам видно, что процесс имеет устойчивый характер, а ошибка регулирования минимальна.

Два других поля рисунка 5 иллюстрируют регулирование нагрузочных режимов агрегатов КЭУ в переходном процессе. Графики на рисунке 5 *b* показывают «измеренные» частоты вращения валов агрегатов, а на рисунке 5 *c* — соответствующие им крутящие моменты, «измеряемые» моделями стендов («Изм.») и развиваемые самими агрегатами («Нетто»). Разности между показателями «Нетто» и «Измерениями», хорошо различимые на участках ускоренного вращения валов, соответствуют инерционным моментам агрегатов.

Заключение. В статье представлена концепция виртуально-физической системы типа Component-in-the-Loop для испытаний автомобильных комбинированных энергоустановок. Системообразующим компонентом CiL-архитектуры является виртуальная трансмиссия, которая согласует нагрузочные режимы силовых агрегатов КЭУ, установленных на лабораторном стенде, тем самым воспроизводя их работу в реальной энергоустановке. CiL-система строится по модульному принципу на основе двух базовых структур: виртуально-физического и виртуального модулей. Введена унификация интерфейсов и способов взаимодействия как между элементами, входящими в состав модулей, так и между самими модулями. Использование данных модулей позволяет создавать масштабируемую CiL-архитектуру, которая реализует многообразие комбинаций компонентов КЭУ и может быть основана на различных вариантах трансмиссий, как бесступенчатых, что показано в настоящей работе, так и ступенчатых, применение которых будет исследовано в продолжении работы.

Верификация посредством вычислительных экспериментов показала, что функционирование математической модели CiL-системы соответствует



a *b* *c*

Рисунок 5 — Частоты вращения валов и крутящие моменты агрегатов, рассчитанные моделью аппаратной части CiL-системы (фрагменты ездового цикла)

Figure 5 — Shaft rpms and torques of the powertrain units calculated by the model of the CiL system (fragments of the driving cycle)

сформулированной концепции. Работа управляющих контуров системы характеризуется устойчивостью и обеспечивает приемлемое качество синхронизации виртуальной и физической частей объекта испытаний. Анализ результатов моделирования также показал адекватное воспроизведение функциональных режимов исследуемой КЭУ THS, включая работу трансмиссии в понижающем и повышающем диапазонах регулирования, характеризующихся разделением и циркуляцией мощности.

Список литературы

1. Fagcang, H. A review of component-in-the-loop: Cyber-physical experiments for rapid system development and integration / H. Fagcang, R. Stobart, T. Steffen // Advances in Mechanical Engineering. — 2022. — Vol. 14, iss. 8. — DOI: https://doi.org/10.1177/16878132221109969.
2. Patent US 4161116, IPC G01L 5/13, G01M 17/007; CPC G01M 17/0072. Inertia and road load simulation for vehicle testing: № 05835225: filing date 21.09.1977: publ. date 17.07.1977 / C.E. Fegraus, S. D'Angelo; applicant Automotive Environmental Systems, Inc. — URL: https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=US37063991&_cid=P11-M9SN-LK-62058-1 (date of access: 20.04.2025).
3. Patent US 4680959, IPC G01M 17/00; CPC G01M 17/00. Emulation system for a motor vehicle drivetrain: № 06854942: filing date 23.04.1986: publ. date 21.07.1987 / K.J. Henry, A.J. Kotwicki; applicant General Motors Corporation — URL: https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=US37660100&_cid=P11-M9SO31-74619-1 (date of access: 20.04.2025).
4. Development of an engine-in-the-loop vehicle simulation system in engine dynamometer test cell / S. Jiang, M. Smith, J. Kitchen, A. Ogawa // SAE Technical Paper. — 2009. — DOI: https://doi.org/10.4271/2009-01-1039.
5. Engine in the loop: closed loop test bench control with real-time simulation / S. Klein, R. Savelsberg, F. Xia [et al.] // SAE Int. J. Commer. Veh. — 2017. — Vol. 10, iss. 1. — P. 95–105. — DOI: https://doi.org/10.4271/2017-01-0219.
6. Jung, T. Engine-in-the-loop: a method for efficient calibration and virtual testing of advanced diesel powertrains / T. Jung, M. Kötter, J. Schaub [et al.] // Simulation und Test 2018. Antriebsentwicklung im Digitalen Zeitalter 20. MTZ-Fachtagung, Hanau, 25–26 Sep. 2018 / Springer Fachmedien GmbH; ed.: J. Liebl. — 2019. — P. 209–224. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-25294-6_12.
7. Global approach for hybrid vehicle optimal control / J. Scordia, R. Trigui, M. Desbois-Renaudin [et al.] // J. Asian Electr. Veh. — 2009. — Vol. 7, iss. 1. — P. 1221–1230. — DOI: https://doi.org/10.4130/jaev.7.1221.
8. Performance comparison of three storage systems for mild HEVs using PHIL simulation / R. Trigui, B. Jeanneret, B. Malaquin, C. Plasse // IEEE Trans. Veh. Technol. — 2009. — Vol. 58, iss. 8. — P. 3959–3969. — DOI: https://doi.org/10.1109/TVT.2009.2028146.
9. Wu, J. Hardware-in-the-loop testing of hybrid vehicle motor drives at Ford Motor Company / J. Wu, C. Dufour, L. Sun // Proc. of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, 1–3 Sep. 2010 / Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. — 2010. — DOI: https://doi.org/10.1109/VPPC.2010.5729036.
10. Systematic development of hybrid systems for commercial vehicles / C. Kaup, T. Pels, P. Ebner [et al.] // SAE Technical Paper. — 2011. — DOI: https://doi.org/10.4271/2011-28-0064.
11. Experimental implementation of power-split control strategies in a versatile hardware-in-the-loop laboratory test bench for hybrid electric vehicles equipped with electrical variable transmission / M. Vafaeipour, M. El Baghdadi, F. Verbelen [et al.] // Appl. Sci. — 2020. — Vol. 10, iss. 12. — DOI: https://doi.org/10.3390/app10124253.
12. Yang, S. A electric vehicle powertrain simulation and test of driving cycle based on AC electric dynamometer test bench / S. Yang, Z. Li, F. Xu [et al.] // Proc. of the 1st International Conference on Mechanical Engineering and Material Science (MEMS 2012), Yangzhou, 16–18 Dec. 2012 / Atlantis Press. — 2012. — P. 273–276. — DOI: https://doi.org/10.2991/mems.2012.169.
13. A test technology of a vehicle driveline test bench with electric drive dynamometer for dynamic emulation / W. Li, X.-H. Shi, D. Guo, P. Yi // SAE Technical Paper. — 2015. — DOI: https://doi.org/10.4271/2015-01-1303.
14. Electric-motor-in-the-loop: Efficient testing and calibration of hybrid power trains / S. Klein, F. Xia, K. Etzold [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2018. — Vol. 51, iss. 31. — P. 240–245. — DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.043.
15. Modularized simulation model of an electric drivetrain for hardware-in-the-loop testing / M. Mennicken, G. Jacobs, L. Feldmann [et al.] // Forschung im Ingenieurwesen. — 2025. — Vol. 89, iss. 1. — DOI: https://doi.org/10.1007/s10010-025-00826-x.
16. Patent US 8631693 B2, IPC G01M 17/00. Wheel slip simulation systems and methods: № 12977375: filing date 23.12.2010: publ. date 28.06.2012 / D.B. Johnson, N.M. Newberger, I.C. Anselmo; applicant Horiba Instruments Inc. (US). — URL: https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=US73613375&_cid=P11-M9SNZN-72094-1 (date of access: 20.04.2025).
17. Patent US 6754615 B1, IPC G06G 7/48, G01M 17/007, B60C 19/00, B60C 23/06, G01M 13/02, G06F 19/00; CPC B60C 23/061, B60C 19/00, B60C 99/006, B60T 2270/86, G01M 13/025, G06F 17/5018, G06F 17/5095. Method of simulating the performance of a vehicle on a road surface: № 09522223: filing date 09.03.2000: publ. date 22.06.2004 / S. Germann, H. Nonn, W. Kopecky, G. Abler, L. Witte, H.T. Xuan, M. Pfeiffer, P. Brodbeck; applicant AVL Deutschland GmbH, Dr. Ing.h.c.F. Porsche Aktiengesellschaft — URL: https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=US40346333&_cid=P11-M9SO41-75346-1 (date of access: 20.04.2025).
18. Component-in-the-loop testing of automotive powertrains featuring all-wheel-drive / I. Kulikov, S. Korkin, A. Kozlov [et al.] // Energies. — 2021. — Vol. 14, iss. 7. — DOI: https://doi.org/10.3390/en14072017.
19. Многопоточные многорежимные гибридные электромеханические трансмиссии / Л.Г. Красневский, С.Н. Поддубко, П.Л. Мариев // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2014. — Вып. 3. — С. 64–68.
20. Karnopp, D.C. Multiport systems and bond graphs – basic bond graph elements / D.C. Karnopp, D.L. Margolis, R.C. Rosenberg // System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems. — 5th ed. — John Wiley & Sons, Inc., 2012. — Ch. 2–3. — P. 17–77.
21. Model architecture, methods, and interfaces for efficient math-based design and simulation of automotive control systems / S. Halbach, P. Sharer, S. Pagerit [et al.] // SAE Technical Paper. — 2010. — DOI: https://doi.org/10.4271/2010-01-0241.
22. Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system: technical report / T.A. Burress, S.L. Campbell, C. Coomer [et al.]. — Oak Ridge, 2011. — 88 p.
23. Шарипов, В.М. Планетарные коробки передач / В.М. Шарипов // Конструирование и расчет тракторов / В.М. Шарипов. — М.: Машиностроение, 2004. — Гл. 4. — С. 182–320.
24. Badin, F. Hybridization / F. Badin // Hybrid vehicles: from components to system / ed. F. Badin. — Paris: Editions Technip, 2013. — Ch. 5. — P. 352–362.
25. Autonomie model validation with test data for 2010 Toyota Prius / N. Kim, A. Rousseau, E. Rask // SAE Technical Paper. — 2012. — DOI: https://doi.org/10.4271/2012-01-1040.
26. Characterization and comparison of two hybrid electric vehicles (HEVs) – Honda Insight and Toyota Prius / M. Duoba, H. Ng, R. Larsen // SAE Technical Paper. — 2001. — DOI: https://doi.org/10.4271/2001-01-1335.

KULIKOV Ilya A., Ph. D. in Eng.
Leading Research Engineer[1]
E-mail: i.kulikov.mami@gmail.com

FISENKO Igor A., Ph. D. in Eng.
Leading Expert of the Expert Council[1]
E-mail: fisenko@nami.ru

[1]FSUE NAMI, Moscow, Russian Federation

Received May 29, 2025.

CYBER-PHYSICAL TESTING SYSTEM FOR AUTOMOTIVE HYBRID POWERTRAINS FEATURING COMPONENT-IN-THE-LOOP ARCHITECTURE WITH VIRTUAL TRANSMISSION

The article presents a concept and a verification study of a Component-in-the-Loop (CiL) system intended for laboratory testing of automotive hybrid powertrains. The proposed approach employs a modular system architecture featuring unified interactions between the physical and the virtual domains, and between the software models. The virtual part of the CiL system is based on a model of the transmission whose type is defined by the topology of the studied powertrain. The virtual transmission is interfaced with dynamometers to interact with the physical powertrain components by coordinating their loading regimes in accordance with the simulated operating modes of the powertrain and the vehicle. These principles allow designing scalable CiL architectures for powertrains with multiple driving units. The validity of the concept was evaluated through numerical experiments using a mathematical model of a CiL setup that embodies the Toyota Hybrid System powertrain, which has a power-split continuously variable transmission as its core element. The simulation results confirm that the CiL system correctly replicates operation of the hybrid powertrain in specified driving conditions, while functioning of its control loops remains stable and properly coordinates loading regimes of the driving units.

Keywords: *cyber-physical testing, Component-in-the-Loop, automotive hybrid powertrains, mathematical modeling, virtual transmission, numerical simulations*

DOI: https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-3-72-27-36

References

1. Fagcang H., Stobart R., Steffen T. A review of component-in-the-loop: cyber-physical experiments for rapid system development and integration. *Advances in mechanical engineering*, 2022, vol. 14, iss. 8. DOI: https://doi.org/10.1177/16878132221109969.
2. Fegraus C.E., D'Angelo S. *Inertia and road load simulation for vehicle testing*. Patent US, no. US4161116, 1977.
3. Henry K.J., Kotwicki A.J. *Emulation system for a motor vehicle drivetrain*. Patent US, no. US4680959, 1987.
4. Jiang S., Smith M., Kitchen J., Ogawa A. *Development of an Engine-in-the-Loop vehicle simulation system in engine dynamometer test cell.* SAE Technical Paper, no. 2009-01-1039, 2009. DOI: https://doi.org/10.4271/2009-01-1039.
5. Klein S., et al. Engine in the loop: closed loop test bench control with real-time simulation. *SAE international journal of commercial vehicles*, 2017, vol. 10, iss. 1, pp. 95–105. DOI: https://doi.org/10.4271/2017-01-0219.
6. Jung T., et al. Engine-in-the-loop: a method for efficient calibration and virtual testing of advanced diesel powertrains. *Simulation und Test 2018. Antriebsentwicklung im Digitalen Zeitalter 20. MTZ-Fachtagung*. Hanau, 2018, pp. 209–224. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-25294-6_12.
7. Scordia J., et al. Global approach for hybrid vehicle optimal control. *Journal of Asian electric vehicles*, 2009, vol. 7, iss. 1, pp. 1221–1230. DOI: https://doi.org/10.4130/jaev.7.1221.
8. Trigui R., Jeanneret B., Malaquin B., Plasse C. Performance comparison of three storage systems for mild HEVs using PHIL simulation. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2009, vol. 58, iss. 8, pp. 3959–3969. DOI: https://doi.org/10.1109/TVT.2009.2028146.
9. Wu J., Dufour C., Sun L. Hardware-in-the-loop testing of hybrid vehicle motor drives at Ford Motor Company. *Proc. IEEE vehicle power and propulsion conference*. Lille, 2010. DOI: https://doi.org/10.1109/VPPC.2010.5729036.
10. Kaup C., et al. *Systematic development of hybrid systems for commercial vehicles*. SAE Technical Paper, no. 2011-28-0064, 2011. DOI: https://doi.org/10.4271/2011-28-0064.
11. Vafaeipour M., et al. Experimental implementation of power-split control strategies in a versatile hardware-in-the-loop laboratory test bench for hybrid electric vehicles equipped with electrical variable transmission. *Applied sciences*, 2020, vol. 10, iss. 12. DOI: https://doi.org/10.3390/app10124253.
12. Yang S. A electric vehicle powertrain simulation and test of driving cycle based on AC electric dynamometer test bench. *Proc. 1st international conference on mechanical engineering and material science (MEMS 2012)*. Yangzhou, 2012, pp. 273–276. DOI: https://doi.org/10.2991/mems.2012.169.
13. Li W., Shi X.-H., Guo D., Yi P. *A test technology of a vehicle driveline test bench with electric drive dynamometer for dynamic emulation*. SAE Technical Paper, no. 2015-01-1303, 2015. DOI: https://doi.org/10.4271/2015-01-1303.
14. Klein S., et al. Electric-motor-in-the-loop: Efficient testing and calibration of hybrid power trains. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, iss. 31, pp. 240–245. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.043.
15. Mennicken M., et al. Modularized simulation model of an electric drivetrain for hardware-in-the-loop testing. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2025, vol. 89, iss. 1. DOI: https://doi.org/10.1007/s10010-025-00826-x.

16. Johnson D.B., Newberger N.M., Anselmo I.C. *Wheel slip simulation systems and methods*. Patent US, no. US8631693 B2, 2012.
17. Germann S., et al. *Method of simulating the performance of a vehicle on a road surface*. Patent US, no. US6754615 B1, 2004.
18. Kulikov I., et al. Component-in-the-loop testing of automotive powertrains featuring all-wheel-drive. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 7. DOI: https://doi.org/10.3390/en14072017.
19. Krasnevski L.G., Poddubko S.N., Mariev P.L. Mnogopotochnye mnogorezhimnye gibridnye elektromekhanicheskie transmissii [Multiline multimode hybrid electromechanical transmissions]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2014, iss. 3, pp. 64–68 (in Russ.).
20. Karnopp D.C., Margolis D.L., Rosenberg R.C. Multiport systems and bond graphs – Basic bond graph elements. *System dynamics: modeling, simulation, and control of mechatronic systems*, 2012, ch. 2–3, pp. 17–77.
21. Halbach S., Sharer P., Pagerit S., Rousseau A., Folkerts C. *Model architecture, methods, and interfaces for efficient math-based design and simulation of automotive control systems.* SAE Technical Paper, no. 2010-01-0241, 2010. DOI: https://doi.org/10.4271/2010-01-0241.
22. Burress T.A., et al. *Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system*. Oak Ridge, 2011. 88 p.
23. Sharipov V.M. Planetarnye korobki peredach [Planetary gearboxes]. *Konstruirovanie i raschet traktorov*, 2004, ch. 4, pp. 182–320 (in Russ.).
24. Badin F. Hybridization. *Hybrid vehicles: from components to system*, 2013, ch. 5, pp. 352–362.
25. Kim N., Rousseau A., Rask E. *Autonomie model validation with test data for 2010 Toyota Prius.* SAE Technical Paper, no. 2012-01-1040, 2012. DOI: https://doi.org/10.4271/2012-01-1040.
26. Duoba M., Ng H., Larsen R. *Characterization and comparison of two hybrid electric vehicles (HEVs) – Honda Insight and Toyota Prius.* SAE Technical Paper, no. 2001-01-1335, 2001. DOI: https://doi.org/10.4271/2001-01-1335.