



МОДЕЛИРОВАНИЕ, УПРАВЛЕНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

Тарраф Мохаммад¹, В. В. Гаевский¹, Диб Мухаммад²

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Россия, 125319, г. Москва, пр. Ленинградский, 64

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

Растущий дефицит и стоимость ископаемого топлива в сочетании с осознанием проблем, связанных с глобальным потеплением, привели в последние годы к разработке гибридных транспортных средств, которые в настоящее время являются промышленным решением для снижения потребления топлива, а значит, и выбросов CO₂ и загрязняющих веществ. На этом фоне недавно был проведен ряд научно-исследовательских программ, посвященных моделированию гибридных автомобилей с целью определения оптимальной архитектуры, моделирования энергетического поведения и определения законов управления энергией; проектированию гибридных автомобилей с целью проверки компонентов и теоретически определенных законов управления энергией; испытаниям автомобилей с целью проверки их работы в реальных условиях. Данная статья посвящена моделированию и симуляции гибридного автомобиля с двумя источниками энергии: двигателем внутреннего сгорания и электродвигателем. Для моделирования принята схема «последовательно-параллельного» гибридного исполнения, поэтому каждый компонент моделируется отдельно. Модель транспортного средства, взятая для моделирования, состоит из набора различных компонентных блоков путем их структурированного соединения. Для управления трансмиссией разрабатывается стратегия управления, роль которой заключается в выборе в каждый момент времени оптимального распределения мощности между различными источниками энергии таким образом, чтобы минимизировать расход топлива и выбросы вредных веществ.

Ключевые слова: последовательно-параллельный гибридный автомобиль, двигатель внутреннего сгорания, автомобильная аккумуляторная батарея, стандартный европейский ездовой цикл, система управления энергией, электродвигатель.

Введение

Автомобильная промышленность испытывает все большее давление, требуя создания автомобилей, использующих преимущества альтернативных источников энергии. В связи с ростом цен на топливо и все более строгими критериями по выбросам вредных веществ в атмосферу необходимо разрабатывать новые технологии для удовлетворения этих потребностей. В то же время автомобильная промышленность должна удовлетворять своих клиентов, поддерживая высокие стандарты производительности, но при этом продолжать пользоваться уже существующей инфраструктурой, такой как «бензоколонки». Такие компании, как Toyota, General Motors (GM) и Ford, прилагают все усилия, чтобы вывести подобные системы на рынок. Разработка системы, объединяющей новые технологии (электрические источники энергии: электродвигатели, аккумуляторы, топливные элементы) с существующими технологиями (бензиновые/дизельные двигатели) для создания гибридного автомобиля, требует масштабного процесса разработки, в который вовлечены все инженеры, участвующие в проектировании. Такая система относится к междисциплинарным системам, требующим множе-

ства навыков для ее разработки, проектирования и управления энергией [1].

В общей конструкции автомобиля задействовано множество компонентов. Некоторые из них совершают поступательные движения, некоторые — вращательные, а некоторые сочетают оба движения относительно друг друга и дороги. Поэтому для точного моделирования реакции автомобиля, особенно при продольном движении, необходимо учитывать динамику нескольких тел [2].

В гибридных автомобилях в трансмиссии выбирается способ работы электромотора в соединении с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Существует три типа структур силовых трансмиссий в гибридном автомобиле: последовательная трансмиссия; параллельная трансмиссия; последовательно-параллельная трансмиссия. Гибриды с последовательной трансмиссией питаются механической энергией только от электромотора, который работает либо от батареи, либо от генератора, работающего на бензине. В гибридах с параллельной трансмиссией электромотор и ДВС могут одновременно отдавать механическую энергию. Последовательно-параллельные трансмиссии позволяют ДВС и электромотору отдавать энергию независимо друг от друга или в сочетании друг с другом [3–4].

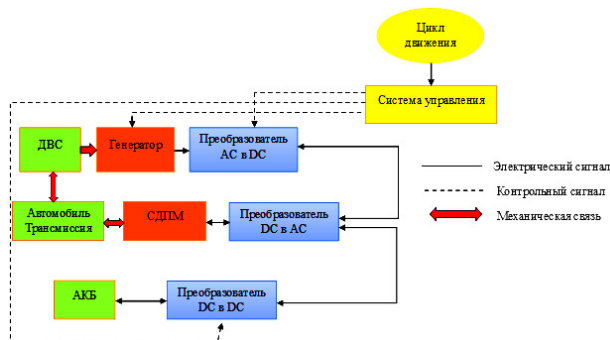


Рис. 1. Общий вид имитационной модели гибридного автомобиля

Fig. 1. General view of the hybrid vehicle's simulation model

Последовательно-параллельные трансмиссии объединяют преимущества и недостатки параллельных и последовательных трансмиссий. Благодаря сочетанию этих двух конструкций двигатель может как напрямую приводить колеса в движение (как в параллельной трансмиссии), так и быть фактически отключенным, когда мощность обеспечивает только электродвигатель (как в последовательной трансмиссии). На низких скоростях он работает скорее как последовательный автомобиль, а на высоких скоростях, где последовательная трансмиссия менее эффективна, на ее место приходит двигатель внутреннего сгорания, и потери энергии сводятся к минимуму [5].

Toyota Prius помогла сделать последовательно-параллельные трансмиссии популярными. В Toyota Prius использована схема последовательно-параллельной гибридной трансмиссии, известной также как гибридная трансмиссия с разделением мощности.

Существуют различные программные средства для моделирования и анализа гибридных автомобилей. Обратное моделирование подразумевает, что на вход подается характеристика скорости, которой должен следовать транспорт, а на выходе получают требуемые значения момента, скорости и мощности для различных компонентов. Самым большим недостатком этого инструмента является его неспособность отразить поведение гибридных автомобилей в переходных процессах, поскольку все компоненты гибридных электромобилей моделируются либо эмпирическими зависимостями, либо данными, собранными во время установившегося режима работы [6].

В перспективных моделях энергия течет от источника к потребителю и заранее известна в качестве входных данных. Она проходит через различные этапы с известными параметрами, начиная от аккумулятора или ДВС и заканчивая электронными переключателями и, наконец, колесами. При перспективном подходе требования к крутящему моменту, напряжениям и токам сравниваются с фактическими переменными системы, и с помощью контроллеров эти ошибки между ними минимизируются для достижения желаемых характеристик [7]. Данный подход, имеющий доступ к внутренним переменным системы, очень удобен для разработки аппаратуры и детального моделирования. Такой подход также позволяет более точно представить динамику системы и стратегию управления, что является важным моментом при слож-

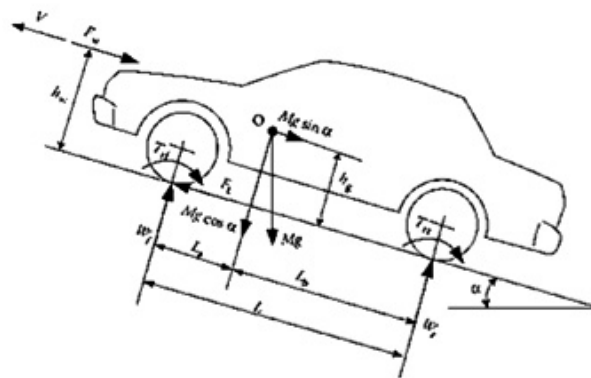


Рис. 2. Силы, действующие на автомобиль
Fig. 2. Forces acting on a vehicle

ном взаимодействии энергосистем и аккумуляторов энергии.

В данной статье в Matlab/Simulink исследуется модель последовательного/параллельного гибридного автомобиля с электроприводом при использовании положения педалей (ускорения/замедления), которые были получены из цикла движения в качестве основного входного сигнала. Моделирование иллюстрирует поток энергии и ее распределение, а также различные режимы работы гибридного автомобиля.

Модель гибридного автомобиля

Все компоненты тяги смоделированы и сгруппированы вместе для построения модели (рис. 1), способной имитировать поведение гибрида, который сочетает различные источники энергии эффективным и оптимальным образом с помощью системы управления, основанной на алгоритме, который позволяет выгодно распределять мощность, что приводит к экономии топлива и снижению выбросов в атмосферу.

Для целей моделирования и воспроизведения дорожной поездки с различными условиями движения используется стандартный европейский ездовой цикл (NEDC) [8]

Динамика автомобиля

Различные силы, которым подвергается движущийся автомобиль, показаны на рис. 2.

Движущийся автомобиль подвергается воздействию различных внешних и массовых сил [9]. Тяговое усилие F_t в зоне контакта шин колеса с поверхностью дороги приводит автомобиль в движение. Оно создается под воздействием крутящего момента двигателя, а затем передается через трансмиссию на ведущие колеса. При движении автомобиля возникает сопротивление. Это сопротивление обычно включает в себя сопротивление качению, аэродинамическое сопротивление и сопротивление подъему. Согласно второму закону Ньютона, ускорение автомобиля можно записать как:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{\delta M}, \quad (1)$$

где V — скорость автомобиля, $\sum F_t$ — общее тяговое усилие автомобиля, $\sum F_r$ — общее сопротивление, M — масса автомобиля, а δ — коэффициент массы, который помогает преобразовать инерцию вращения вращающихся элементов в перемещение.

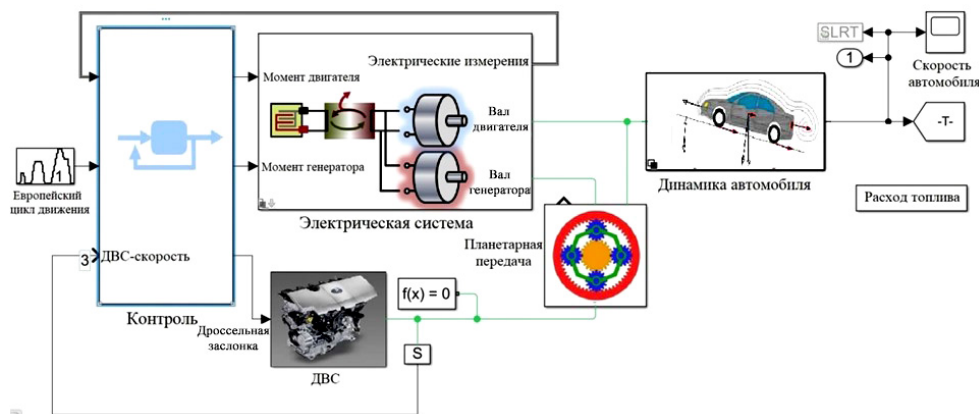


Рис. 3. Модель гибридного автомобиля с использованием Matlab Simulink
Fig. 3. Hybrid vehicle's model using Matlab Simulink

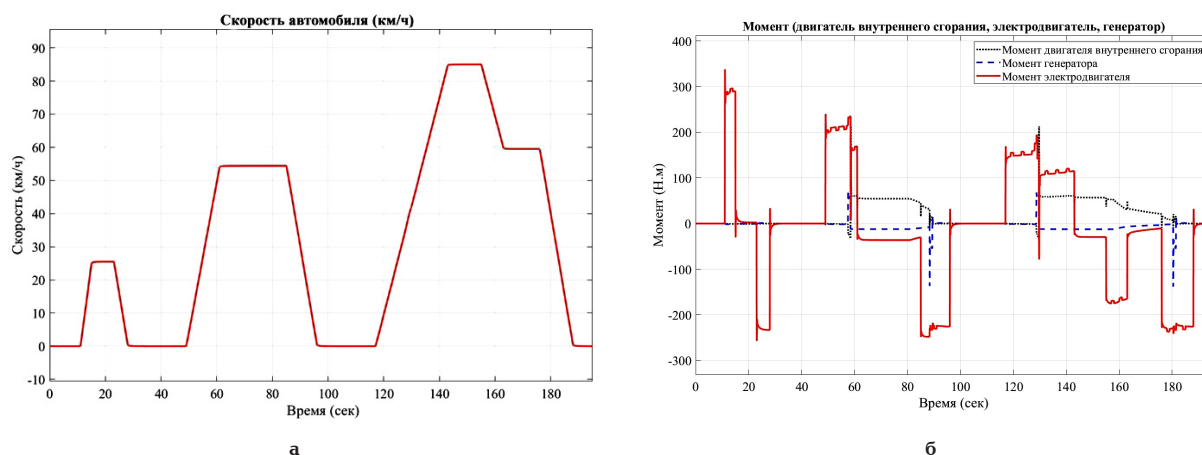


Рис. 4. Параметры автомобиля: а — скорость автомобиля (км/ч); б — моменты ДВС, электродвигателя и генератора
Fig. 4. Vehicle parameters: а — vehicle speed (km/h); б — torques of internal combustion engine, electric motor and generator

Динамическое уравнение для движения автомобиля в прямолинейном направлении имеет вид [10]:

$$M \frac{dV}{dt} = (F_{tr} + F_{tr}) - F_{rr} + F_{rr} + F_g + F_w \quad (2)$$

где F_{tr} и F_{tr} — тяговое усилие передних и задних шин; F_{rr} и F_{rr} — сопротивление качению передних и задних шин; F_g — сопротивление на склоне; F_w — аэродинамическое сопротивление.

Автомобиль моделируется как движущаяся масса, на которую действует движущая сила F_t , развиваемая трансмиссией, и различные силы, связанные с окружающей средой.

Система управления энергией

Представленная система управления энергией использует простой алгоритм, основанный на пороговой логике. Ее задача — в зависимости от положения педали акселератора и скорости автомобиля управлять трансмиссией, роль которой заключается в выборе в каждый момент времени оптимального распределения мощности между различными источниками энергии с целью минимизации расхода топлива и выбросов вредных веществ.

Для лучшего понимания был использован Stateflow, чтобы проиллюстрировать различные режимы работы гибридного двигателя, а также переходы от одного источника энергии к другому. Существует четыре возможных режима работы:

Режим запуска

Автомобиль запускается от электродвигателя. Цель состоит в том, чтобы иметь полностью элек-

трический режим и держать двигатель внутреннего сгорания выключенным, чтобы не использовать его в зоне низкого КПД.

Ускорение

При интенсивном разгоне электродвигатель выдает максимальную мощность в основном от аккумулятора, а также от генератора, который приводится в действие двигателем внутреннего сгорания. Двигатель внутреннего сгорания работает в зоне оптимальной эффективности, поскольку при высокой потребности в крутящем моменте двигатель внутреннего сгорания выдает максимальную мощность.

Крейсерский режим

В крейсерском режиме эпиточическая коробка передач распределяет мощность, вырабатываемую двигателем внутреннего сгорания, непосредственно приводя в движение колеса, а также генератор, который, в свою очередь, обеспечивает мощность, необходимую электродвигателю, что, в свою очередь, способствует увеличению тягового усилия.

Режим торможения

Когда автомобиль тормозит или замедляется, электрическая машина работает в режиме генератора и рекуперировывает кинетическую энергию торможения для подзарядки аккумулятора.

Результаты моделирования

На рис. 3 показана полная симуляционная модель гибридного автомобиля.

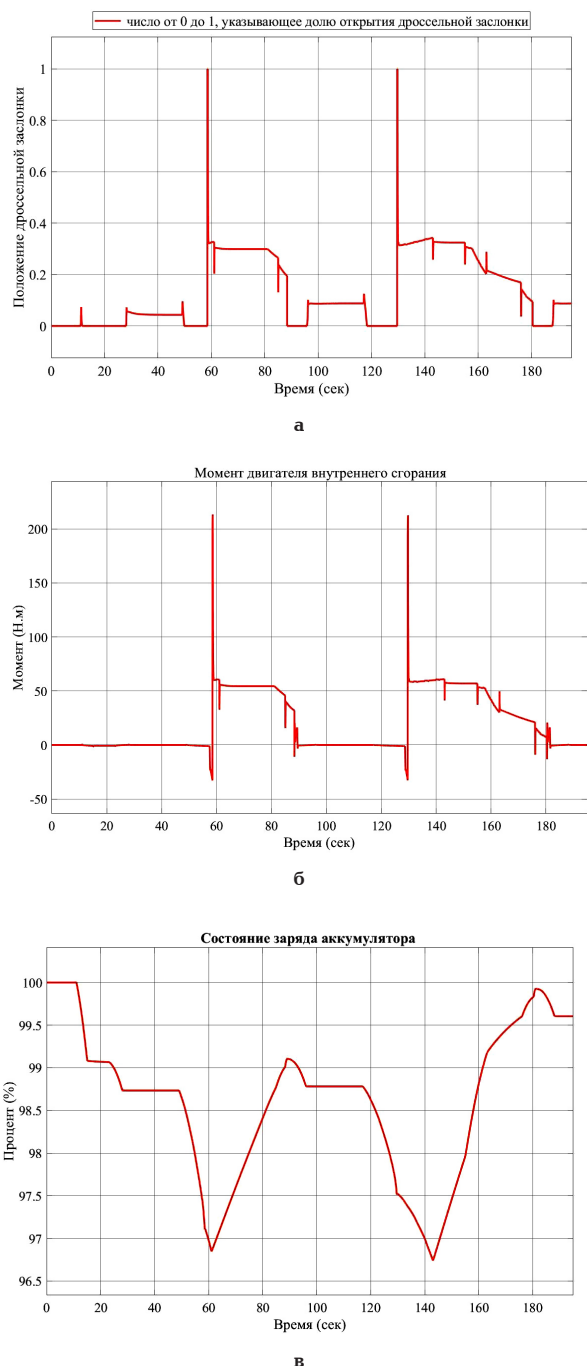


Рис. 5. Параметры автомобиля, учитываемые при движении:

а — сигнал педали акселератора; б — момент ДВС; в — уровень заряда аккумулятора

Fig. 5. Vehicle parameters considering at driving:
а — accelerator pedal signal; б — internal combustion engine torque; в — battery charge level

На рис. 4а, б показаны параметры автомобиля, моделируемые в программе. На основе распределения моментов определяются основные функции гибридного автомобиля: когда автомобиль неподвижен, ДВС систематически отключается. Электродвигатель запускает автомобиль до определенной скорости, после чего включается ДВС для обеспечения тяги и одновременной подзарядки автомобильной аккумуляторной батареи (АКБ) через электродвигатель, который работает в режиме генератора. Когда скорость автомобиля стабилизируется (при скорости ниже 50 км/ч), тяга переходит в чисто электрический режим. Любое замедление автомобиля проис-

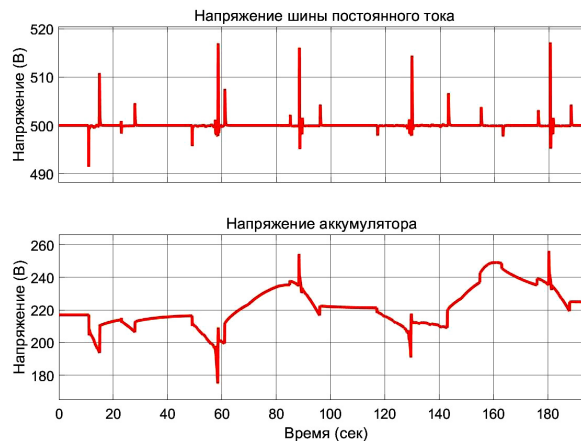


Рис. 6. Параметры электрической составляющей автомобиля при движении
Fig. 6. Electrical component parameters of the vehicle at driving

ходит за счет электрической машины, которая рекуперировывает энергию торможения.

Состояния двигателей автомобиля подтверждают результаты моделирования: электродвигатель вносит непрерывный вклад в течение всего цикла поездки, а состояние ДВС показывает, что он задействуется только в периоды высокой потребности в мощности, например при ускорении. Наконец, генератор включается при выключении двигателя внутреннего сгорания для подачи энергии на электродвигатель; он мгновенно отключается при включении двигателя внутреннего сгорания, а затем снова запускается для подзарядки аккумулятора. Добавление электродвигателя значительно снижает использование двигателя внутреннего сгорания и даже позволяет приводить автомобиль в движение полностью на электричестве.

На рис. 5а, б, в показаны параметры автомобиля, учитываемые при движении. Достижение скорости, задаваемой водителем с помощью педали акселератора, идентично показателю крутящего момента двигателя внутреннего сгорания.

Исходя из положения педали акселератора и скорости автомобиля, электронный блок управления определяет оптимальную скорость вращения двигателя внутреннего сгорания и степень открытия дроссельной заслонки. По результатам расчетов был смоделирован полностью электрический режим, когда при выключенном двигателе активируется только электрический двигатель. Намерение держать двигатель внутреннего сгорания выключенным в значительной степени объясняется его неэффективностью на низких скоростях. При ограниченной системе аккумулирования энергии и мощности двигателя/генераторной установки полностью электрический режим включался на низких скоростях и в условиях низкого энергопотребления.

Состояние заряда аккумулятора (%) — это состояние заряда аккумулятора во время используемого цикла движения (рис. 5в). Первое состояние заряда составляло 100 %. Рабочий диапазон составляет от 100 до 96 %. Нисходящий график отражает характер разряда в течение короткого периода моделирования. Колебания состояния заряда были вызваны тем, что аккумулятор питался за счет рекуперативного торможения. Из-за ограничения работы аккумулятора при низком уровне заряда автомо-

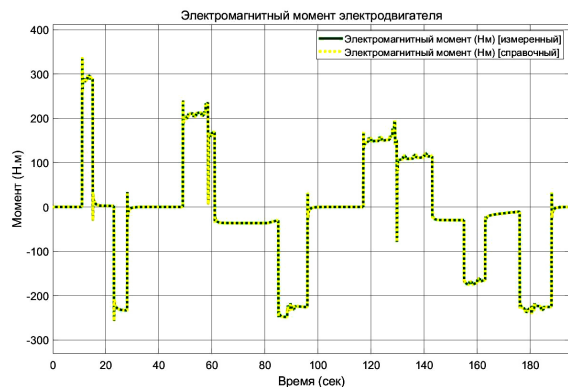


Рис. 7. Электромагнитный момент электродвигателя
Fig. 7. Electromagnetic torque of the electric motor

биль достигает точки, когда необходимо запустить двигатель внутреннего сгорания.

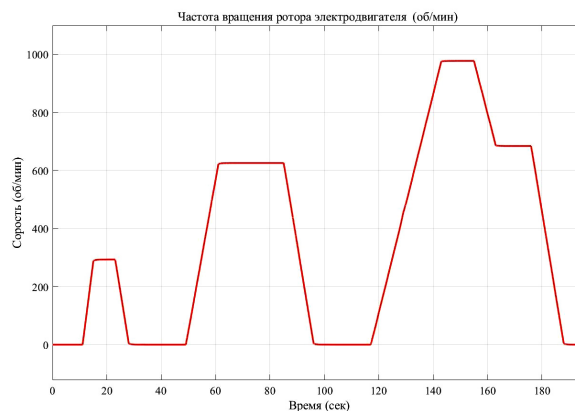
В результате время работы в полностью электрическом режиме в этом цикле движения составило 60 секунд. Если емкость системы накопления энергии не была увеличена, время работы в полностью электрическом режиме всегда зависит от состояния заряда аккумулятора и для него не существует установленного времени или диапазона.

На рис. 6 показаны параметры электрической составляющей автомобиля при движении.

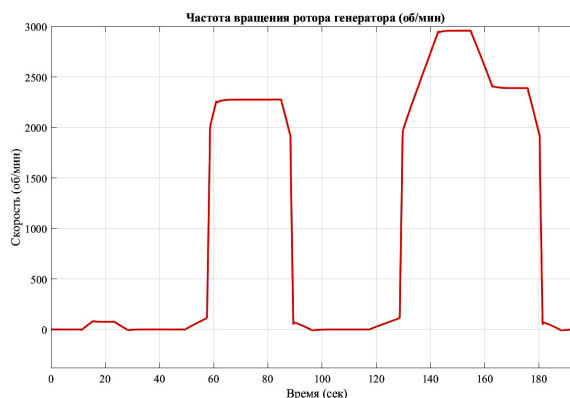
Напряжение на аккумуляторе поддерживается на уровне около 220 В. Во время разгона напряжение падает ниже 220 В для питания двигателя, а во время замедления аккумулятор подзаряжается, получая энергию от торможения. Напряжение шины постоянного тока инверторов повышается с помощью преобразователя до 500 В, что обеспечивает меньший ток (и, следовательно, меньшие потери) при той же потребляемой мощности. При этом временная эволюция фазового тока статора в зависимости от скорости адаптируется и его амплитуда подстраивается к изменению скорости.

На рис. 7 показаны изменения электромагнитного момента электродвигателя. Сначала мы имеем высокий момент двигателя при запуске. Двигатели сохраняют этот высокий электромагнитный момент после остановки до тех пор, пока их скорость не стабилизируется. После этого крутящий момент двигателя начинает уменьшаться, а затем стабилизируется.

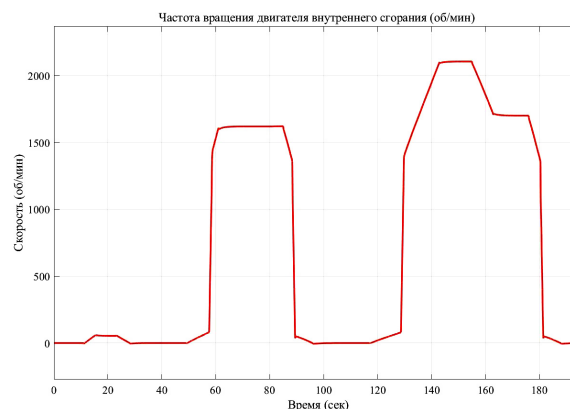
На рис. 8а, б, в показаны частоты вращения электродвигателя, генератора и ДВС соответственно (об/мин). Частота вращения электродвигателя идентична скорости автомобиля. Это связано с полностью электрическим режимом, в котором преобладает тяга автомобиля. Частота вращения генератора идентична скорости ДВС, что объясняется гибридной архитектурой используемого гибридного автомобиля, где генератор приводится в действие двигателем внутреннего сгорания. Стратегия управления выбирает оптимальное распределение мощности между электромотором, генератором и аккумулятором. Эта стратегия позволяет постоянно поддерживать электромотор в рабочем состоянии, не разряжая аккумулятор, и подзаряжать его во время замедления. Это означает, что ДВС может использоваться с максимальной эффективностью, а выбросы оксидов углерода могут быть снижены или даже исключены, в частности, за счет запуска автомобиля полностью на электротяге.



а



б



в

Рис. 8. Частоты вращения двигателей: а — частота вращения ротора электродвигателя (об/мин); б — частота вращения ротора генератора (об/мин); в — частота вращения ДВС (об/мин)

Fig. 8. Engine speeds: а — electric motor rotor speed (rpm); б — generator rotor speed (rpm); в — internal combustion engine speed (rpm)

Заключение

1. Используемая архитектура автомобилей и стратегия управления обеспечивают очень выгодное распределение мощности с точки зрения расхода топлива, поскольку на скорости ниже 50 км/ч автомобиль может двигаться в полностью электрическом режиме с выключенным двигателем внутреннего сгорания.

2. Выше указанной скорости гибридная стратегия управления способна приводить автомобиль в движение как с помощью электрического двигателя, так и с помощью двигателя внутреннего сгорания в зависимости от уровня заряда аккумулятора.

3. Чтобы решить проблему зарядки аккумулятора, была проведена рекуперация энергии торможения, вырабатываемой двигателем внутреннего сгорания, для подзарядки аккумулятора гибридного автомобиля.

4. Моделирование в Matlab/Simulink показывает стабильную работу автомобиля, который следует заданному циклу движения. Выбор компонентов и технологические достижения в области электроники, силовой электроники и автоматизации облегчили интеграцию экологически чистой энергии в традиционные автомобили.

5. В статье подчеркивается важность управления энергией, поскольку наличие двух видов энергии на борту автомобиля означает, что она должна эффективно распределяться, чтобы ездить без ограничений.

Приложение

Параметры автомобиля (Снаряженная масса: 1325 кг)

— ДВС

Максимальная мощность — 11,4 кВт;

Максимальная скорость — 6000 об/мин.

Расход топлива:

Обычный бензин

Город — 51 миль на галлон;

Шоссе — 49 миль на галлон;

Комбинированный — 50 миль на галлон.

Электричество + бензин

Комбинированный — 95 миль на галлон.

— Аккумулятор

Номинальное напряжение — 200 В;

Номинальная емкость — 8,1 Ач;

Последовательное сопротивление — 0,02 Ω;

Начальное состояние заряда — 75,75 %.

— Синхронный двигатель с постоянным магнитом

Сопротивление статора — 0,0910 Ω;

Индуктивность — 16e-04 Гн;

Максимальный крутящий момент — 400 Нм;

КПД — 91 %.

— Генератор

Сопротивление статора — 0,0048 Ω;

Индуктивность — 6,3500e-04 Гн;

Максимальный крутящий момент — 400 Нм;

КПД — 94 %.

Список источников

1. Шабанов А. В., Ломакин В. В., Шабанов А. А., Сальников В. И. Применение комбинированных силовых установок на автомобилях и экологическая безопасность окружающей среды // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. № 1 (15). С. 232–239. EDN: QIMILT.

2. Alagarsamy T., Moulik B. Review on optimal design of hybrid electric vehicles and electric vehicles // 2018 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Pune, India. 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/I2CT.2018.8529748.

3. Thommyppillai M. P. Optimal path-tracking of virtual racecars using gainscheduled preview control: PhD thesis, Imperial College of London. London, United Kingdom. 2010. 177 p.

4. Bradai S., Ghariani M., Guermazi A. Study of the traction chains of different models of electric vehicles with the ADVISOR tool // 2016 7th International Renewable Energy Congress

(IREC), Hammamet, Tunisia. 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/IREC.2016.7478878.

5. Brooker A., Hendricks T., Johnson V. [et al.]. Advisor 3. 2+ Documentation. National renewable energy laboratory, National wind technology center, Washington, D. C. Office, 2001.

6. Wipke K. B., Cuddy M. R., Burch S. D. Advisor 2. 1: a user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1999. Vol. 48. P. 1751–1761. DOI: 10.1109/25.806767.

7. Gaurav A., Gaur A. Modelling of hybrid electric vehicle charger and study the simulation results // 2020 International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET), Patna, India. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICEFEET49149.2020.9187007.

8. Шишков Д. А., Дуганова Е. В., Резников Н. В. Особенности конструкции последовательно-параллельной схемы исполнения гибридной силовой установки на примере автомобиля Toyota Prius // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса: сб. ст. XIII Междунар. науч.- практ. конф. / под ред. В. В. Салмина. Пенза: Изд-во РИО ПГАУ, 2019. С. 233–237. EDN: UGUFQL.

9. Emadi A., Rajashekara K., Williamson S., Lukic S. Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configuration // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2005. Vol. 54 (3). P. 763–770. DOI: 10.1109/TVT.2005.847445.

10. Сатер Г., Гаевский В. В., Шадрин С. С. Расчетно-экспериментальный метод повышения надежности подвески автомобиля // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2020. № 4 (63). С. 20–28. EDN: OGRGVL.

ТАРРАФ МОХАММАД, аспирант кафедры «Автомобили» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), г. Москва.

Адрес для переписки: mohammadasaat90@gmail.com
ГАЕВСКИЙ Виталий Валентинович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Автомобили» МАДИ, г. Москва.

SPIN-код: 2212-1128

AuthorID (РИНЦ): 293298

AuthorID (SCOPUS): 57195109825

ORCID: 0000-0002-0349-0813

Адрес для переписки: vit-life@rambler.ru

ДИБ МУХАММАД, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.

AuthorID (SCOPUS): 57216623195

Адрес для переписки: muhamaddeeb002@gmail.com

Для цитирования

Тарраф Мохаммад, Гаевский В. В., Диб Мухаммад. Моделирование, управление и регулирование энергопотребления гибридного автомобиля // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 1. С. 64–71. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-64-71. EDN: ACAFJE.

Статья поступила в редакцию 30.01.2025 г.

© Тарраф Мохаммад, В. В. Гаевский, Диб Мухаммад



MODELLING, CONTROLLING AND REGULATING THE ENERGY CONSUMPTION OF A HYBRID VEHICLE

Tarraf Mohammad¹, V. V. Gayevskiy¹, Deeb Muhammad²

¹Moscow State Automobile and Road Construction State Technical University,
Russia, Moscow, Leningradskiy Ave., 64, 125319

²National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya Str., 14, bld. 1, 111250

The increasing scarcity and cost of fossil fuels, combined with the awareness of global warming issues, have led in recent years to the development of hybrid vehicles, which are now an industrial solution to reduce fuel consumption and thus CO₂ emissions and pollutants. Against this background, a number of research programmes have recently been conducted on hybrid vehicle modelling to determine the optimal architecture, simulate energy behaviour and define energy management laws; hybrid vehicle design to validate components and theoretically defined energy management laws; and vehicle testing to verify vehicle performance under real-world conditions. This paper focuses on modelling and simulation of a hybrid vehicle with two energy sources: an internal combustion engine and an electric motor. A 'series-parallel' hybrid scheme is adopted for modelling, so each component is modelled separately. The vehicle model taken for modelling consists of a set of different component blocks by connecting them in a structured manner. A control strategy is developed to control the powertrain, the role of which is to select at each instant of time the optimal power allocation between the different power sources in such a way as to minimize fuel consumption and emissions.

Keywords: series-parallel hybrid vehicle, internal combustion engine, automotive battery, standard European driving cycle, energy management system, electric motor.

References

1. Shabanov A. V., Lomakin V. V., Shabanov A. A., Sal'nikov V. I. *Primeneniye kombinirovannykh silovyykh ustanovok na avtomobilyakh i ekologicheskaya bezopasnost' okruzhayushchey sredy* [The use of combined power units in vehicles and environmental safety]. *Izvestiya MG TU «MAMI»*. 2013. No. 1 (15). P. 232–239. EDN: QIMILT. (In Russ.).
2. Alagarsamy T., Moulik B. A Review on Optimal Design of Hybrid Electric Vehicles and Electric Vehicles. *3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/I2CT.2018.8529748. (In Engl.).
3. Thommypillai M. P. Optimal path-tracking of virtual race-cars using gainscheduled preview control: PhD thesis, Imperial College of London. London, United Kingdom. 2010. 177 p. (In Engl.).
4. Bradai S., Ghariani M., Guermazi A. Study of the traction chains of different models of electric vehicles with the ADVISOR tool. *7th International Renewable Energy Congress (IREC)*. 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/IREC.2016.7478878. (In Engl.).
5. Brooker A., Hendricks T., Johnson V. [et al.]. Advisor 3. 2+ Documentation. National Renewable Energy Laboratory, National Wind Technology Center, Washington, D. C. Office, 2001. (In Engl.).
6. Wipke K. B., Cuddy M. R., Burch S. D. Advisor 2. 1: a user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1999. Vol. 48. P. 1751–1761. DOI: 10.1109/25.806767. (In Engl.).
7. Gaurav A., Gaur A. Modelling of Hybrid Electric Vehicle Charger and Study the Simulation Results. *International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICEFEET49149.2020.9187007. (In Engl.).
8. Shishkov D. A., Duganova E. V., Reznikov N. V. Osobennosti konstruktivnoy posledovatel'no-parallel'noy skhemy ispolneniya gibridnoy silovoy ustanovki na primere avtomobilya Toyota Prius [Design features of the series-parallel execution scheme of the hybrid power plant on the example of the Toyota Prius]. *Perspektivnyye napravleniya razvitiya avtotransportnogo kompleksa. Perspective Directions of the Development of the Motor Transport Complex* / ed. by V. V. Salmin. Penza, 2019. P. 233–237. EDN: UGUFQL. (In Russ.).
9. Emadi A., Rajashekara K., Williamson S., Lukic S. Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configuration. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2005. Vol. 54 (3). P. 763–770. DOI: 10.1109/TVT.2005.847445. (In Engl.).
10. Sater G., Gayevskiy V. V., Shadrin S. S. Raschetno-eksperimental'nyy metod povysheniya nadezhnosti podveski avtomobilya [Design-experimental method of increasing the reliability of car suspension]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI). Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*. 2020. No. 4 (63). P. 20–28. EDN: OGRGVL. (In Russ.).

TARRAF MOHAMMAD, Graduate Student of the Automobiles Department, Moscow State Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow.

Correspondence address: mohammadasaat90@gmail.com

GAYEVSKIY Vitaliy Valentinovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Automobiles Department, MADI, Moscow.

SPIN-code: 2212-1128

AuthorID (RSCI): 293298

AuthorID (SCOPUS): 57195109825

ORCID: 0000-0002-0349-0813

Correspondence address: vit-life@rambler.ru

DEEB MUHAMMAD, Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Electromechanics, Electrical and Electronic Apparatuses Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow.

AuthorID (SCOPUS): 57216623195

Correspondence address: muhamaddeeb002@gmail.com

For citations

Tarraf Mohammad, Gayevskiy V. V., Deeb Muhammad. Modelling, controlling and regulating the energy consumption of a hybrid vehicle. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 1. P. 64–71. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-64-71. EDN: ACAFJE.

Received January 30, 2025.

© Tarraf Mohammad, V. V. Gayevskiy,
Deeb Muhammad