
МЕХАНИКА МАШИН

УДК 629.3

**СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
КОМБИНИРОВАННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ
ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**© 2019 г. И. А. Куликов^{1,*}, Л. Ю. Лежнев², С. В. Бахмутов¹¹ *Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (НАМИ),
г. Москва, Россия*² *Московский политехнический университет, г. Москва, Россия
e-mail: i.kulikov.mami@gmail.com

Поступила в редакцию 22.06.2018 г.

Исследование комбинированных энергоустановок выполнено посредством математического моделирования. Проведено сравнение энергоустановок, имеющих трансмиссии с наиболее известными схемами: последовательной, параллельной и последовательно-параллельной (power-split). Учитывалась возможность зарядки тяговой батареи энергоустановки от внешней электрической сети.

DOI: 10.1134/S0235711919010103

Одним из способов повышения энергетической эффективности транспортных энергоустановок, а также снижения ущерба, наносимого ими окружающей среде, является их “гибридизация” или создание комбинированных энергоустановок [1–3]. В энергоустановках этого типа к традиционному двигателю внутреннего сгорания (ДВС) добавляется накопитель электрической энергии (тяговая аккумуляторная батарея) и электромеханическая трансмиссия, которая обеспечивает обмен энергией между ДВС, батареей и автомобилем. Комбинированная энергоустановка имеет несколько функций, позволяющих ей выполнять свое назначение: оптимизация режима работы двигателя, рекуперация кинетической энергии при замедлении автомобиля и движение на электрической тяге с выключенным двигателем.

При создании транспортного средства с комбинированной энергоустановкой первой задачей является выбор схемы трансмиссии и характеристик компонентов энергоустановки. Схема определяет число компонентов энергоустановки и связи между ними (механические и электрические). Она выбирается из нескольких вариантов путем их сопоставления по ряду аспектов. В первую очередь рассматривается конструктивная сложность схемы и характеристики, которые она обеспечивает автомобилю (тягово-скоростные, топливно-экономические, экологические). В настоящей статье представлено сравнительное исследование схем комбинированных энергоустановок с целью выбора наиболее энергоэффективного варианта для применения на малотоннажном грузовом автомобиле. Рассмотренные энергоустановки снабжены тяговыми батареями повышенной емкости для обеспечения широкого скоростного диапазона движения с выключенным ДВС и возможности достаточно длительного движения на электротяге. Исследование проведено посредством математического моделирования.

Сравниваемые схемы энергоустановок. В проведенном исследовании выполнено сравнение трех наиболее известных схем комбинированных энергоустановок: последовательной, параллельной и последовательно-параллельной [2].

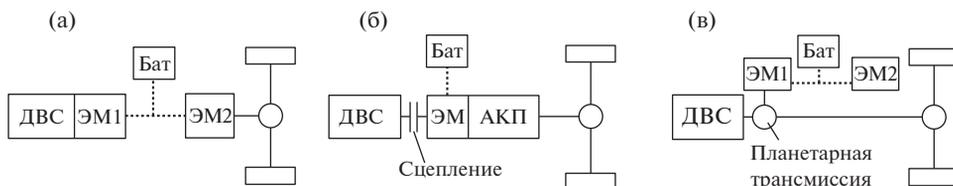


Рис. 1. Схемы комбинированных энергоустановок. а – последовательная; б – параллельная с автоматической коробкой передач; в – последовательно-параллельная (power-split).

В последовательной схеме (рис. 1, а) ДВС не имеет механической связи с колесами автомобиля – его вал соединен с генератором (ЭМ1). Генератор создает нагрузку на валу двигателя и передает вырабатываемую энергию через силовое электрическое соединение в тяговую электромашину (ЭМ2), соединенную с приводом ведущих колес автомобиля. Батарея (Бат) соединена с инверторами обеих электромашин так, что они могут заряжать ее или забирать из нее энергию. В данной схеме генератор должен иметь мощность не меньшую, чем ДВС, а тяговая электромашин должна в длительном режиме работы обеспечивать полный тягово-скоростной диапазон автомобиля.

В параллельной схеме (рис. 1, б) и ДВС, и тяговая электромашин (ЭМ) механически соединяются с приводом ведущих колес. Если ДВС не работает, то он отсоединяется от трансмиссии с помощью сцепления. Для обеспечения требуемого тягово-скоростного диапазона автомобиля используется автоматическая коробка передач (АКП) [4, 5], которую в проведенном исследовании считали ступенчатой.

В последовательно-параллельной схеме (рис. 1, в) мощность ДВС передается к колесам двумя путями – электрическим и механическим. Для разделения потока мощности (или суммирования потоков) используется планетарная трансмиссия, звенья которой связаны с валами ДВС и двух электромашин (ЭМ1 и ЭМ2). Первая электромашин выполняет функцию уравнивания планетарной передачи и одновременно регулирует режим работы двигателя (угловую скорость его вала). Создавая нагрузку на одном из звеньев трансмиссии, первая электромашин может либо вырабатывать ток (режим генератора), либо потреблять его (режим двигателя) в зависимости от соотношения угловых скоростей звеньев планетарной передачи. Ток передается во вторую электромашин и в тяговую батарею или забирается у них. Таким образом создается электрическая ветвь трансмиссии, в которой складывается мощность, отобранная у ДВС, и мощность, вырабатываемая или потребляемая батареей. Мощность ДВС, не отобранная электроприводом, передается механическим путем от звена, соединенного с валом двигателя, к выходному звену трансмиссии. Тяговая электромашин механически связана с выходным звеном трансмиссии и создает на нем тяговый или тормозной момент.

Из известных последовательно-параллельных схем энергоустановок наибольшее распространение в настоящее время получила Toyota Hybrid System, называемая схемой power-split [2, 6]. Она используется в серийных автомобилях Prius, Lexus Hybrid, а также, с некоторыми модификациями, в гибридных автомобилях фирмы Ford. В настоящем исследовании этот вариант последовательно-параллельной схемы был выбран для моделирования.

В последовательной схеме и в power-split реализуются бесступенчатые трансмиссии, которые позволяют управлять частотой вращения вала ДВС независимо от скорости движения автомобиля. В результате становится возможным точное отслеживание характеристики минимального удельного расхода топлива. В параллельной схеме частота вращения вала двигателя зависит от скорости автомобиля и выбранной пере-

дачи, что не всегда позволяет двигателю работать в режимах минимального расхода топлива. Наличие во всех схемах энергетического буфера в виде тяговой батареи позволяет управлять мощностью ДВС независимо от нагрузки, определяемой режимом и условиями движения автомобиля. Разность между мощностью, вырабатываемой ДВС, и мощностью, требуемой для движения автомобиля, компенсируется с помощью электромашин, которые могут забирать избыток мощности в батарею, работая в режиме генератора, или вырабатывать недостающую мощность в режиме электродвигателя.

Все три схемы позволяют автомобилю двигаться на электротяге с выключенным ДВС. В последовательной схеме и в power-split электротягу осуществляет вторая электромашинка. В параллельной схеме отсоединение ДВС от трансмиссии в режиме электротяги обеспечивается с помощью выключения сцепления. В схеме power-split при выключенном двигателе первая электромашинка не создает крутящего момента, и, следовательно, планетарный механизм не работает (разгружен). Момент сил трения в двигателе препятствует повороту его вала. Таким образом, в этой схеме для отсоединения ДВС от трансмиссии не требуется дополнительного устройства типа муфты.

В последовательной схеме и в power-split пуск ДВС осуществляется первой электромашинкой. В параллельной схеме пуск происходит при включении сцепления. Чтобы при этом двигатель не отбирал мощность у автомобиля, замедляя его, электромашинка создает компенсирующий крутящий момент.

Модель движения автомобиля. Режимы движения автомобиля, характерные для реальных условий эксплуатации, воспроизводятся ездовыми циклами, в которых движение считается прямолинейным. Модель прямолинейного движения автомобиля выведена со следующими допущениями: сцепление шин с опорной поверхностью достаточно высокое и, следовательно, проскальзывание колес пренебрежимо малое. Крутильная жесткость привода ведущих колес не учитывается. Не учитывается динамическое перераспределение нормальных реакций опорной поверхности и изменение радиусов колес. Привод ведущих колес осуществляется через главную передачу. К ней может присоединяться одна из трансмиссий, модели которых описаны ниже. С учетом принятых допущений модель движения автомобиля можно представить в виде дифференциального уравнения

$$\dot{v} = \frac{(T_0 u_0 \eta_0^{\text{sgn}(T_0)}) \frac{1}{r} - F_w - F_f - F_\alpha}{m + n J_k / r^2},$$

где v – скорость автомобиля; m – масса автомобиля; T_0 – крутящий момент на ведущем валу главной передачи; u_0 – передаточное число главной передачи; $\eta_0^{\text{sgn}(T_0)}$ – КПД главной передачи с учетом направления крутящего момента; r – радиус колеса; J_k – момент инерции колеса; n – число колес автомобиля; F_w , F_f и F_α – силы сопротивления движению.

Расчет силы аэродинамического сопротивления выполняется по формуле, известной из теории автомобиля $F_w = 0.5 C_x A \rho v^2$, где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления; A – площадь передней проекции автомобиля; ρ – плотность воздуха.

Сила сопротивления качения шин рассчитывается следующим образом: $F_f = mgf$, где g ускорение свободного падения (9.81 м/с^2), f – коэффициент сопротивления качения шины; f определяется с помощью эмпирической формулы [7, 8] $f = f_0 + k_v v^2$, где f_0 коэффициент сопротивления качения при скорости, близкой к 0; k_v – коэффициент повышения сопротивления качения в зависимости от скорости. В модели принято допущение, что все шины автомобиля имеют одинаковое сопротивление качению.

Таблица 1

| m , кг | r , м | J_K , кг · м ² | u_0 | η_0 , % | C_x | A , м ² | f_0 | k_v |
|----------|---------|-----------------------------|-------|--------------|-------|----------------------|--------|-------------------|
| 6000 | 0.35 | 4.5 | 4.3 | 95 | 0.65 | 5.5 | 0.0085 | $4 \cdot 10^{-6}$ |

Сопротивление движению на подъеме (или скатывающая сила на спуске) является составляющей силы тяжести, направленной параллельно опорной поверхности, и рассчитывается следующим образом: $F_\alpha = mg \sin(\alpha)$, где α – угол наклона опорной поверхности.

Значения параметров, используемых в формулах модели динамики автомобиля, представлены в табл. 1.

Модели трансмиссий. Для каждой из рассмотренных схем энергоустановок модель трансмиссии была представлена в виде системы уравнений, описывающих динамику вращения звеньев трансмиссии, крутящий момент на ее выходном валу и кинематические связи в ней.

В последовательной схеме вращение вала ДВС не зависит от скорости автомобиля, что дает дополнительное уравнение динамики в модели трансмиссии, которую можно представить в виде следующей системы уравнений:

$$\dot{\omega}_e = \dot{\omega}_{ЭМ1} = \frac{T_e + T_{ЭМ1}}{J_e + J_{ЭМ1}},$$

$$T_0 = (T_{ЭМ2} - J_{ЭМ2}\dot{\omega}_{ЭМ2})u_{ред}\eta_{ред}^{\text{sgn}(T_0)}, \quad \omega_{ЭМ2}r = \nu u_{ред}u_0,$$

где ω_e , $\omega_{ЭМ1}$ и $\omega_{ЭМ2}$ – угловые скорости валов ДВС и электромашин соответственно; T_e , $T_{ЭМ1}$ и $T_{ЭМ2}$ – крутящие моменты ДВС и электромашин; J_e , $J_{ЭМ1}$ и $J_{ЭМ2}$ – моменты инерции вращающихся частей ДВС и электромашин; $u_{ред}$ и $\eta_{ред}$ – соответственно передаточное число и КПД редуктора, устанавливаемого между тяговой электромашинной и главной передачей.

Трансмиссия энергоустановки параллельного типа с автоматической коробкой передач имеет три режима работы, которые определяются состояниями сцепления: сцепление полностью выключено, сцепление буксует, сцепление полностью включено. В первом и втором состояниях вал двигателя внутреннего сгорания имеет собственную степень свободы, что дает следующую систему уравнений:

$$J_e\dot{\omega}_e = T_e - T_{цп} \text{sgn}(\omega_e - \omega_{ЭМ}), \quad \omega_{ЭМ}r = \nu u_{АКП}u_0,$$

$$T_0 = (T_{цп} \text{sgn}(\omega_e - \omega_{ЭМ}) + T_{ЭМ} - J_{ЭМ}\dot{\omega}_{ЭМ})u_{АКП}\eta_{АКП}^{\text{sgn}(T_0)},$$

где $T_{цп}$ – момент трения сцепления; $u_{АКП}$ и $\eta_{АКП}^{\text{sgn}(T_0)}$ – соответственно передаточное число и КПД автоматической коробки передач (на включенной передаче). Выражение $\text{sgn}(\omega_e - \omega_{ЭМ})$ вводит зависимость знака момента трения сцепления от соотношения угловых скоростей соединяемых звеньев. При полном включении сцепления уравнение вращения вала ДВС и момент $T_{цп}$ можно исключить из модели, что оставит в ней только одну степень свободы.

Для составления модели трансмиссии Toyota Hybrid System использовали расчетную схему, приведенную на рис. 2. Каждое звено планетарного механизма связано с одним из двигателей: водило – с валом ДВС, солнечная шестерня – с первой электромашинной, эпицикл – со второй электромашинной. Эпицикл планетарного ряда является выходным звеном трансмиссии. Индексы a , b , c на схеме обозначают соответственно солнечную шестерню, водило и эпицикл. Стрелками показаны направления крутящих моментов на звеньях трансмиссии.

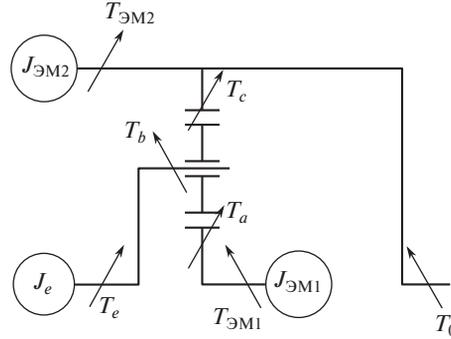


Рис. 2. Расчетная схема трансмиссии последовательно-параллельного типа (power-split).

При выводе уравнений модели использовали известные формулы силовых и кинематических связей в планетарном механизме [9, 10]. Выходной вал трансмиссии представлен в виде упругодемпфирующего звена, что позволяет не выполнять громоздкое приведение системы к двум массам и делает модель проще. Полученная система уравнений выглядит следующим образом:

$$J_e \dot{\omega}_e = T_e - T_c \frac{k+1}{k} \eta_{\text{внутр}}^{\text{sgn}(-T_c)}, \quad J_{\text{ЭМ1}} \dot{\omega}_{\text{ЭМ1}} = T_{\text{ЭМ1}} - \frac{T_c}{k} \frac{\eta_{\text{внутр}}^{\text{sgn}(-T_c)}}{\eta_{\text{внеш}}^{\text{sgn}(-T_{\text{ЭМ1}} \omega_{\text{ЭМ1}})}},$$

$$\dot{T}_c = c(\omega_{\text{ЭМ2}} - \omega_0) + \gamma(\dot{\omega}_{\text{ЭМ2}} - \dot{\omega}_0), \quad T_0 = (T_c + T_{\text{ЭМ2}} - J_{\text{ЭМ2}} \dot{\omega}_{\text{ЭМ2}}) u_{\text{ред}} \eta_{\text{ред}}^{\text{sgn}(T_0)},$$

$$\omega_{\text{ЭМ2}} k = \omega_e (k+1) - \omega_{\text{ЭМ1}}, \quad \omega_0 r = v u_{\text{ред}} u_0,$$

где T_c – крутящий момент на эпицикле; k – конструктивный параметр планетарного ряда, равный отношению чисел зубьев эпициклической и солнечной шестерен; $\eta_{\text{внутр}}^{\text{sgn}(-T_c)}$ – КПД зацепления с внутренним зубом (зацепление сателлитов с эпициклом) с учетом направления крутящего момента на эпицикле; $\eta_{\text{внеш}}^{\text{sgn}(-T_{\text{ЭМ1}} \omega_{\text{ЭМ1}})}$ – КПД зацепления с внешним зубом (зацепление сателлитов с солнечной шестерней) с учетом знака мощности, которая передается между водилом и солнечной шестерней; c и γ – соответственно жесткость и коэффициент демпфирования выходного вала трансмиссии; ω_0 – угловая скорость выходного вала трансмиссии.

Модели ДВС и электропривода. При разработке и исследовании комбинированных энергоустановок и их систем управления обычно не требуется моделирование внутренних процессов в ДВС и электрических машинах. Это позволяет использовать упрощенные модели агрегатов, представляющие собой функции, которые связывают их входные и выходные параметры [11]. В настоящей статье в качестве таких функций применяются статические характеристики агрегатов, полученные экспериментальным путем.

Для моделирования ДВС используются характеристики крутящего момента и мгновенного расхода топлива в зависимости от частоты вращения вала и величины топливоподачи. Для электромашин используются характеристики КПД (вместе с инвертором) в зависимости от частоты вращения ротора и крутящего момента в режимах двигателя и генератора.

Во всех схемах энергоустановок использован бензиновый ДВС с максимальной мощностью 104 кВт и максимальным крутящим моментом 225 Н · м. Для автомобиля массой 6 тонн мощность этого двигателя мала, однако недостаток мощности компен-

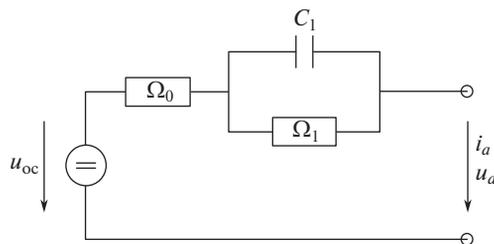


Рис. 3. Схема замещения литий-ионного аккумулятора.

сируется с помощью батареи и тяговой электромашин. Тяговый электропривод в рассматриваемых схемах имеет максимальную мощность порядка 150 кВт.

Модель тяговой батареи. Базовым элементом тяговой батареи является литий-ионный аккумулятор. В литературе описаны различные подходы к моделированию аккумуляторов этого типа [11–13]. Самыми распространенными и практичными являются модели, представляющие собой эквивалентные схемы или схемы замещения аккумуляторов. Это электрические схемы, которые содержат источники напряжения, резисторы и конденсаторы (конкретный состав зависит от разновидности схемы), соединенные друг с другом и с источником нагрузки, которым обычно является модель электропривода. Схема замещения воспроизводит изменение напряжения аккумулятора в ответ на заданную нагрузку – ток разряда или заряда.

Практически все схемы замещения, представленные в литературе, обеспечивают высокую точность расчета напряжения [12, 13]. Однако наиболее адекватное отражение переходных процессов обеспечивается моделями, включающими фильтрующие элементы в виде конденсаторов. В настоящей статье была выбрана наиболее простая схема с одним конденсатором, представленная на рис. 3. В этой схеме i_a и u_a – ток и напряжение на клеммах аккумулятора, Ω_0 – внутреннее сопротивление аккумулятора. Параллельное соединение конденсатора c_1 и резистора Ω_1 выполняет функцию фильтра напряжения; u_{oc} – напряжение разомкнутой цепи (без нагрузки), которое задается в виде статической характеристики в функции степени заряженности аккумулятора.

Составив для данной схемы уравнения равновесия токов и напряжений по правилам Кирхгофа, после преобразований получаем систему, которая является математической моделью аккумуляторной ячейки

$$\dot{u}_1 = \frac{i_a \Omega_1 - u_1}{\Omega_1 c_1}, \quad u_a = u_{oc} - i_a \Omega_0 - u_1.$$

При моделировании тяговой батареи делается допущение, что все входящие в нее аккумуляторные ячейки сбалансированы, т.е. их степени заряженности и напряжения одинаковы. Это допущение позволяет установить связь напряжения батареи и входящей в нее усредненной ячейки $u_6 = u_a n_a$, где n_a – число ячеек в батарее (соединение ячеек последовательное).

КПД аккумуляторной ячейки определяется в основном рассеиванием мощности на внутреннем сопротивлении [11, 12]. В соответствии с законом Джоуля–Ленца эта мощность рассчитывается следующим образом: $P_{a, \text{потери}} = i_a^2 \Omega_0$. Используя мощность потерь, можно вывести уравнение КПД аккумулятора

$$\eta_a = \left[\frac{|i_a u_a|}{|i_a u_a| + \text{sgn}(i_a) i_a^2 \Omega_0} \right]^{\text{sgn}(i_a)}.$$

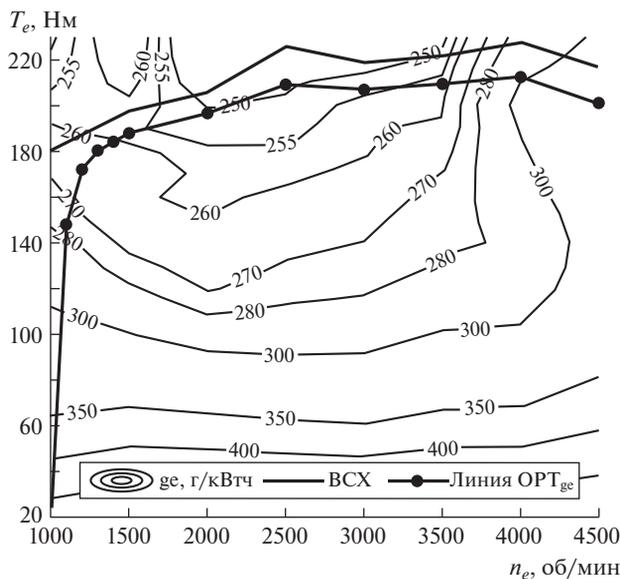


Рис. 4. Характеристика удельного расхода топлива ДВС с линией оптимизированных режимных точек.

Степень заряженности¹ аккумулятора рассчитывается интегрированием тока с учетом КПД [11, 12]:

$$SOC_a = SOC_{a,0} + \frac{100\%}{3600Q_{a,0}} \int (i_a \eta_a^{\text{sgn}(i_a)}) dt,$$

где $SOC_{a,0}$ – начальная степень заряженности, %; $Q_{a,0}$ – номинальная зарядная емкость аккумулятора ($A \cdot ч$); функция $\text{sgn}(i_a)$ используется для учета направления тока (заряд/разряд). Во всех рассмотренных энергоустановках использована батарея с зарядной емкостью $100 A \cdot ч$, номинальным напряжением $330 В$ и энергоемкостью $33 кВт \cdot ч$.

Управление энергоустановками. Расчетное сравнение схем энергоустановок возможно только при наличии алгоритмов управления, причем необходимо, чтобы эти алгоритмы в равной степени реализовывали потенциал энергоэффективности сравниваемых схем. В этой связи для всех рассмотренных схем были разработаны алгоритмы, использующие одинаковые принципы управления и одинаковые настройки (насколько это позволяют отличия схем).

Алгоритмы управления обеспечивают следующие режимы работы энергоустановок: движение на электротяге с выключенным ДВС; замедление автомобиля с рекуперацией кинетической энергии; “гибридный режим”, в котором ДВС включен и передает мощность через трансмиссию на ведущие колеса (избыток или недостаток мощности двигателя компенсируется тяговой батареей). Условия перехода между режимом электротяги и “гибридным режимом” задаются пороговыми значениями скоростей включения и выключения ДВС, между которыми введен “гистерезис”, предотвращающий заикливание. Пороговые значения являются переменными и зависят от интенсивности движения и степени заряженности батареи. Они могут меняться в диапазоне $10, \dots, 60 \text{ км/ч}$.

¹ В публикациях по тематике комбинированных энергоустановок получило распространение обозначение степени заряженности батареи англоязычной аббревиатурой SOC (State of Charge).

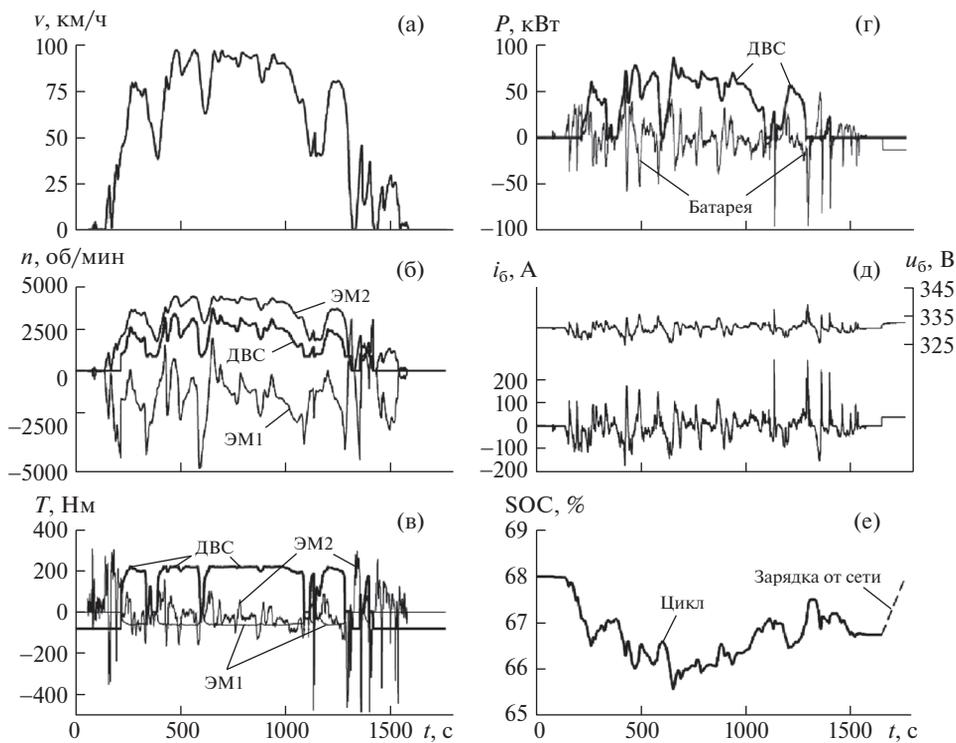


Рис. 5. Пример результатов моделирования: энергоустановка типа power-split.

В схемах энергоустановок с бесступенчатыми трансмиссиями в “гибридном режиме” топливоподача ДВС является функцией частоты вращения его вала. Эта функция задается в виде линии оптимизированных режимных точек ДВС [14, 15], обеспечивающей его работу с минимальным для заданной мощности удельным расходом топлива (g_e). На рис. 4 показана многопараметровая характеристика ДВС по g_e с нанесенными на ней внешней скоростной характеристикой (ВСХ) и линией оптимизированных режимных точек (ОРТ g_e).

Требуемая частота вращения вала ДВС является функцией положения педали акселератора. Сигнал акселератора предварительно пропускается через фильтр, который задает степень “сглаживания” режима работы двигателя или степень “буферизации мощности” тяговой батареей. Уменьшение полосы пропускания фильтра снижает динамику регулирования двигателя и повышает степень использования тяговой батареи для движения автомобиля. “Буферизация мощности” позволяет снизить интенсивность переходных процессов в двигателе и уменьшить связанный с ними дополнительный расход топлива и вредные выбросы.

В случае энергоустановки параллельной схемы управление ДВС осуществляется не по требуемой частоте вращения, а сразу по сигналу топливоподдачи, который также пропускается через фильтр для снижения динамики регулирования.

Вычислительные эксперименты и их результаты. Рассматриваемые в настоящей статье энергоустановки относятся к типу с подзаряжаемой от внешней сети тяговой батареей. Оценка энергетической эффективности энергоустановок этого типа требует учета не только расхода топлива двигателем внутреннего сгорания, но и потребления

Таблица 2

| Схема энергоустановки | Ездовой цикл | | |
|-----------------------|--------------|------------|-----------|
| | Городской | Загородный | Смешанный |
| Последовательная | 0% | 0% | 0% |
| Параллельная | -30.7% | -20% | -23.2% |
| Power-split | -31.5% | -17.6% | -22.2% |

электрической энергии из сети, которое происходит при восполнении заряда тяговой батареи после завершения цикла движения [16]. В случае испытаний автомобиля или их моделирования в конце ездового цикла батарея должна быть заряжена от сети до исходного состояния. Это условие энергического баланса, которое является обязательным для оценки энергетической эффективности комбинированной энергоустановки.

Для корректного сравнения нескольких схем энергоустановок к моделированию предъявляются дополнительные требования: вычислительный эксперимент должен воспроизводить один и тот же ездовой цикл для всех сравниваемых схем; величина электроэнергии, полученной из сети по окончании ездового цикла, должна быть одинаковой для всех сравниваемых схем; настройки систем управления для всех энергоустановок должны быть одинаковыми (насколько это позволяют различия схем).

На рис. 5 показан пример результатов вычислительного эксперимента для схемы power-split при движении автомобиля в загородном ездовом цикле. На графиках представлены следующие переменные: скорость автомобиля v ; частоты вращения n валов ДВС и электромашин; крутящие моменты T двигателей и электромашин; мощности P двигателей и тяговой батареи (положительная при *разряде*); ток i_b (положительный при *заряде*) и напряжение u_b тяговой батареи; степень заряженности тяговой батареи. График степени заряженности состоит из двух частей: первая соответствует выполнению ездового цикла (цикл), вторая соответствует фазе восполнения энергии батареей от сети после прохождения цикла (зарядка от сети).

Полная программа вычислительных экспериментов включала три ездовых цикла: городской, загородный и смешанный. В каждом из них был проведен ряд экспериментов с различными величинами энергии батареи, восполняемой от сети: 2, 4 и 8 кВт · ч. Выполнение условия равенства этой энергии для всех схем энергоустановок позволяет сравнивать их энергоэффективность, используя путевой расход топлива (л/100 км). Сравнение удобно проводить относительно схемы, показавшей наибольший расход топлива, каковой является последовательная схема. В табл. 2 представлены относительные показатели экономии топлива, усредненные для всех экспериментов в трех ездовых циклах.

Анализ схем комбинированных энергоустановок и результатов проведенных вычислительных экспериментов позволяет сделать следующие выводы.

Расход топлива при использовании последовательной схемы значительно больше, чем в случаях параллельной и последовательно-параллельной схем. Это связано с тем, что трансмиссия в последовательной схеме имеет относительно низкий КПД из-за двойного преобразования энергии: сначала в генерирующем электроприводе, а затем в тяговом.

Наилучшая топливная экономичность была достигнута с параллельной схемой. Однако ее преимущество перед схемой power-split в среднем составило порядка 1%. Такая разница довольно условна и позволяет считать, что параллельная схема и power-

split обеспечивают практически одинаковую энергоэффективность в применении к исследуемому автомобилю.

Эффективность параллельной схемы достигается за счет высокого КПД при передаче мощности от ДВС к ведущим колесам, а также за счет большой загрузки двигателя. Последнее, однако, возникает вынужденно, если ДВС работает с низкой частотой вращения вала, при которой его максимальная мощность мала. Это обусловлено скоростью автомобиля, с которой угловая скорость вала ДВС жестко связана через ступенчатую коробку передач. При использовании ДВС малой мощности эта особенность становится минусом этой схемы, поскольку при интенсивном движении автомобиля компенсация недостатка мощности ДВС требует большого расхода энергии из тяговой батареи.

Конструктивным и экономическим преимуществом параллельной схемы является использование в ней только одной электромашин. Однако эту схему нельзя назвать простой из-за наличия в ней автоматической коробки передач и сцепления с системами управления, адаптированными для комбинированной энергоустановки.

С точки зрения сочетания энергоэффективности, гибкости управления и возможностей оптимизации режима работы ДВС лучшим вариантом для исследуемого автомобиля можно считать комбинированную энергоустановку последовательно-параллельной схемы (power-split). Конструктивно она существенно проще, чем параллельная схема. Реализуемая в power-split бесступенчатая трансмиссия позволяет управлять мощностью ДВС независимо от скорости автомобиля, не допуская повышенного расхода энергии тяговой батареи. Недостатком схемы power-split можно считать необходимость использования двух электромашин, однако первая электромашин в силу особенностей планетарной передачи имеет относительно небольшую мощность.

Статья подготовлена в рамках соглашения № 14.577.21.0249 от 26 сентября 2017 года о предоставлении субсидии при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57717X0249.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Badin F. Ed.* Hybrid Vehicles: From Components to System.//Editions Technip, Paris, 2013.
2. *Miller J.M.* Propulsion Systems for Hybrid Vehicles. 2nd Ed. The Institution of Engineering and Technology, 2010.
3. *Куликов И.А., Круташов А.В., Филонов А.И., Бахмутов С.В.* Оптимальное управление комбинированными энергетическими установками транспортных средств // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 6. С. 92–99.
4. *Саламандра К.Б.* Модульные многоскоростные коробки передач // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 5. С. 20–26.
5. *Саламандра К.Б., Тывес Л.И.* Интегральный принцип в задачах динамического анализа переключений в автоматических коробках передач // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 5. С. 22–29.
6. *Matsubara T., Yaguchi H., Takaoka T., Jinno K.* Development of New Hybrid System for Compact Class Vehicles // SAE Technical Paper 2009-01-1332. 2009.
7. *Петрушов В.А.* Автомобили и автопоезда. Новые технологии исследования сопротивлений качения и воздуха. М.: Торус Пресс, 2008. 61 с.
8. *Genta G.* Motor vehicle dynamics. Modeling and simulation // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2006. P. 43–44.
9. *Шарипов В.М.* Конструирование и расчет тракторов. М.: Машиностроение, 2004. С. 182–320.
10. *Алюшин Ю.А., Еленев С.А., Вержанский П.М.* Кинематические соотношения в планетарных передачах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 3. С. 3–9.
11. *Guzzella L., Sciarretta A.* Vehicle Propulsion Systems. Introduction to Modeling and Optimization. Third Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
12. *Plett G.L.* Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 2. Modeling and identification // Journal of Power Sources. 2004. № 134. P. 262–276.

-
13. *Hu X., Li S., Peng H.* A comparative study of equivalent circuit models for li-ion batteries // *Journal of Power Sources*. 2012. № 198. P. 359–367.
 14. *Лежнев Л.Ю.* Улучшение топливно-экономических и экологических показателей ДВС в составе комбинированных энергетических установок автотранспортных средств // Дис. наиск. степени к.т.н. М.: Моск. политехн. ун-т, 2005. С. 38–48.
 15. *Serrarens A.F.A.* Coordinated control of the Zero Inertia powertrain: PhD thesis // Technische Universiteit Eindhoven. 2001. P. 21–31.
 16. Правила ЕЭК ООН №101. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей, оборудованных двигателем внутреннего сгорания, в отношении измерения объема выбросов двуокиси углерода и расхода топлива, а также транспортных средств категорий М1 и N1, оборудованных электроприводом в отношении измерения расхода электроэнергии и запаса хода.