



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ С КЭУ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТИПА

В статье приводится методика теоретического определения свойств топливной экономичности гибридных автомобилей с параллельной схемой расположения компонентов комбинированной энергоустановки по заданному циклу движения. Представлен алгоритм вычисления на примере стандартного ездового цикла NEDC, результаты вычисления расхода топлива и предполагаемая эффективность использования гибридных автомобилей в руб./км в зависимости от среднегодового пробега.

Гибридный автомобиль, комбинированная энергоустановка, топливная экономичность, эффективность использования, алгоритм вычисления.

Параллельная схема гибридного двигателя применяется на автомобилях Geely Atlas PRO, Honda Insight, Honda Civic, Mercedes-Benz S-400 Hybrid, BMW 7-Series Limousine Active Hybrid. Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) в такой схеме соединен с валом механической трансмиссии и колесами, обеспечивая механическую передачу мощности на ведущие колеса, как и на традиционном автомобиле. На том же валу установлен и электродвигатель-генератор (МГ), также играющий роль маховика. Электрический привод состоит из МГ, электронного управления (инвертора) и высоковольтной батареи [1]. На шоссе автомобиль движется с помощью ДВС, который также через мотор-генератор подзаряжает ВВБ. При разгоне или других условиях, когда требуется максимальная мощность, оба двигателя работают параллельно, их мощность суммируется. При торможении двигателем электромотор, работающий в режиме генератора, возвращает энергию в накопитель. Эта схема позволяет уменьшить мощность ДВС, что снижает количество расходуемого топлива.

При анализе данной схемы следует учитывать тот факт, что во время движения автомобиля ДВС работает всегда, т.е. механический поток энергии присутствует всегда. Электромотор подключается при пиках возрастания нагрузки, т.е. на заданном уровне скорости и момента, генератор включается в работу в режимах движения со средней нагрузкой и при торможении двигателем.

Методика оценки эффективности применения ДВС в условиях неустановившегося режима работы была изложена ранее [2]. Достаточно давно профессором Ефремовым была изложена методика расчета силового электропривода легковых и грузовых автомобилей [3].

Для определения оптимальной мощности ДВС, работающего в комбинации с электрическим приводом, необходима методика расчета, учитывающая па-

раметры автомобиля (массу, площадь лобового сопротивления), заданные динамические условия движения и характеристики самих элементов привода (трансмиссии, электромотора, накопителя энергии, силового преобразователя, генератора).

Методика включает: тяговый расчет; энергетический расчет последовательной схемы соединения элементов привода; энергетический расчет параллельной схемы соединения элементов привода. Все разделы связаны друг с другом, что позволяет производить сравнительный анализ и выбирать оптимальную схему привода для данного ТС в зависимости от заданного маршрута движения. Для удобства методика смоделирована и заложена в алгоритм программы расчета ГСУ-АВТО [4], что позволило произвести исследования и получать теоретические зависимости.

Основой расчета является ездовой цикл, который представляет собой график зависимости скорости транспортного средства, продольного угла наклона плоскости дороги от времени ($V = f(t)$; $\alpha = f(t)$). Данные зависимости можно получить практическим путем, записав изменение параметров при движении по заданному маршруту; задать теоретически. В данном случае использован стандартный городской цикл по протоколу испытаний легковых автомобилей (директива 80/1268 ЕС 2004 год), а именно городская его часть.

С помощью известных формул тягового расчета [5] найдены силы сопротивления, действующие на автомобиль в каждой i -й точке. N_{Ki} – сила сопротивления качению; N_{Bi} – сила сопротивления воздуха; N_{Ii} – сила сопротивления инерции; N_{Pi} – сила сопротивления подъему.

Суммарная сила сопротивления, действующая на транспортное средство в каждой измеренной точке равна сумме всех сил:

$$N_{Ti} = N_{Ki} + N_{Bi} + N_{Ii} + N_{Pi}, \text{ кВт.}$$

Средняя мощность тяги на всем участке движения – $N_{\text{ср.пол.}}$ (рис. 1) – показывает среднюю величину только положительных значений мощности тяги на всем расчетном участке. Фактически является средней

мощностью привода ГСУ без учета возвращенной от рекуперации энергии:

$$N_{\text{ср.пол.}} = \frac{\sum_1^n N_{\text{ср.пол.}i}}{n}, \text{ кВт}, \quad \sum N_T > 0.$$

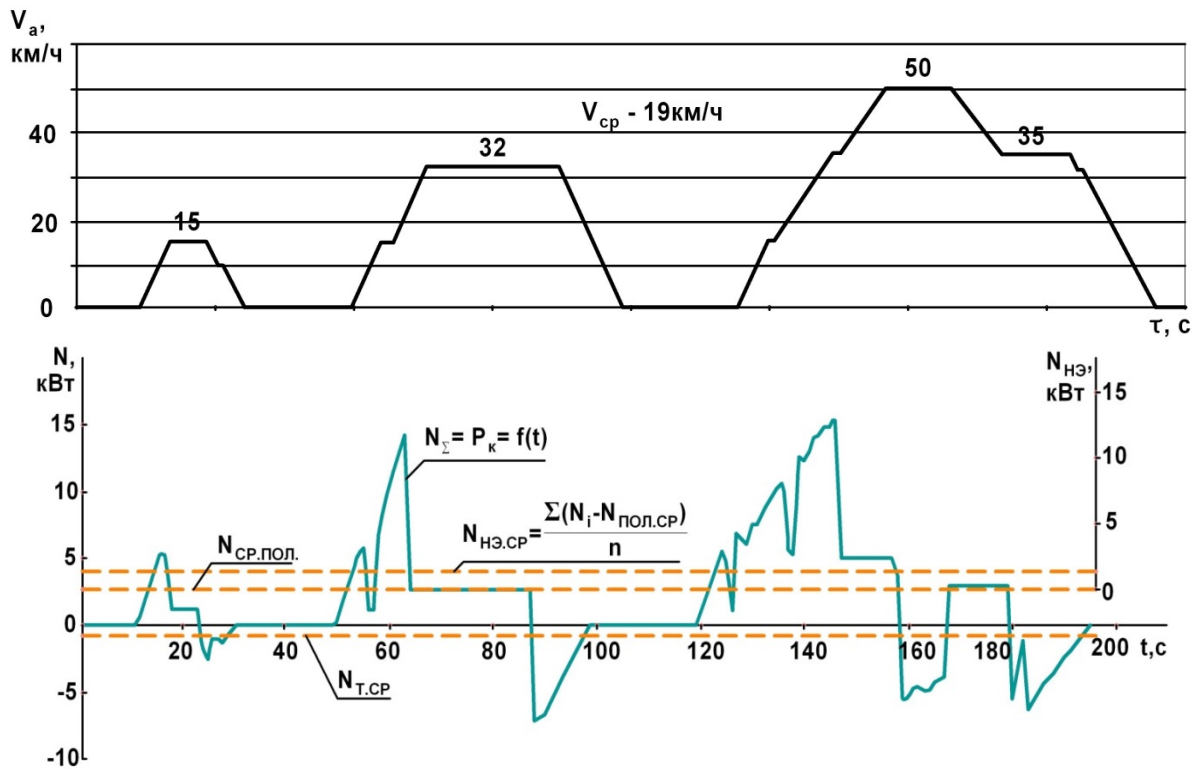


Рис. 1. Стандартный Европейский ездовой цикл испытаний автомобилей на токсичность (городская часть) и график изменения суммарной мощности сопротивления (сила тяги) на ведущих колесах:

$N_{Ti} = f(t)$; $N_{\text{ср.пол.}}$ – средняя положительная мощность на участке;

$N_{T,\text{ср}}$ – средняя отрицательная мощность (средняя мощность торможения);

$N_{\text{нэ.ср}}$ – средняя мощность пиковых нагрузок (средняя мощность накопителя энергии)

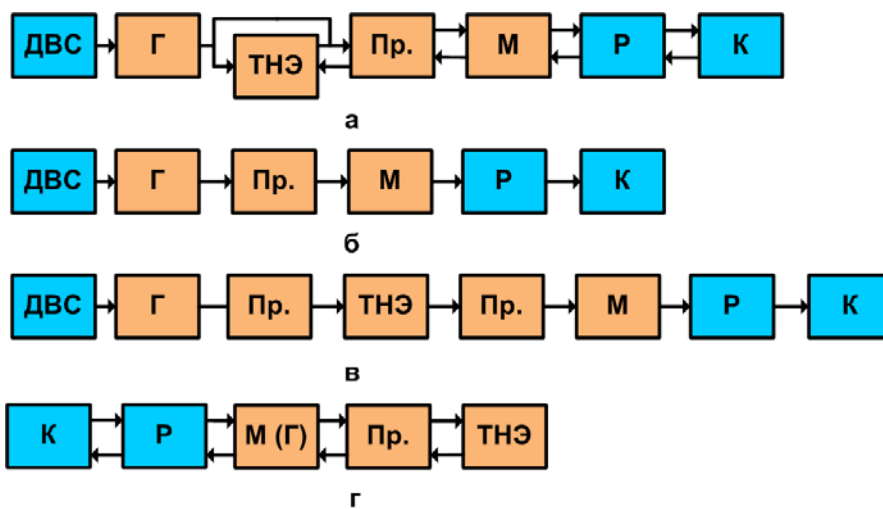


Рис. 2. Блок схемы потерь в последовательной схеме привода:

а) общая цепочка потерь; б) при прямой передаче энергии;

в) при передаче энергии через тяговый накопитель;

г) при реализации мощности, возвращенной при торможении

Средняя отрицательная мощность на всем участке движения – $N_{T.CP}$ (рис. 1) – показывает среднюю величину только отрицательных значений мощности тяги на всем расчетном участке. Фактически – это средняя мощность, поглощенная тормозными механизмами или рекуперированная обратно в накопитель энергии:

$$N_{T.CP} = \frac{\sum_1^n N_{T.OTPi}}{n}, \text{ кВт}, \quad \sum N_T < 0.$$

Параллельная схема гибридного привода имеет принципиальные отличия. Как и в обычном автомобиле, в ней есть механическая передача и трансмиссия. Электромотор установлен параллельно трансмиссии и задействуется только при разгонах, разгружая ДВС. Избыточная энергия двигателя при движении расходуется генератором для заряда накопителя.

Электромотор в параллельной схеме является обратимым, т.е. может работать в режиме генератора, но заряд возможен только при средних нагрузках и в режиме торможения двигателем. Пики нагрузки сглаживаются электромотором, что позволяет уменьшить мощность ДВС, однако неэффективные режимы работы и холостой ход при этом не могут быть исключены, из-за чего падает коэффициент энергетической эффективности ДВС (K) [6].

Согласно особенностям параллельной схемы в расчет заложен алгоритм вычисления средней потребной мощности $N_{CP.ПОТР}$ гибридного тягового привода на маршруте только в тех промежутках времени, где задействован ДВС ($N_{ВЫХ} > 0$).

Мощность ДВС с учетом потерь при передаче энергии будет складываться из мощности, передаваемой по прямой ветви с учетом потерь в механической передаче, мощности, передаваемой через электромотор (параллельная цепь). Также необходимо учесть потери в цепочке привода при передаче энергии от ДВС к накопителю, потери в самом накопителе и потери при передаче энергии к колесам автомобиля (рис. 2а).

$N_{CP.ПОЛ}$ показывает средний уровень мощности, который необходим автомобилю на заданном участке движения. Причем площадь, ограниченная графиком изменения мощности выше $N_{CP.ПОЛ}$ – это энергия, которая должна быть получена от параллельной цепочки привода ГСУ. Среднее значение мощности выше $N_{НЭ.CP}$ будет являться средней мощностью параллельной ветви $N_{ЭЛ.CP}$. Таким образом, зная $N_{CP.ПОЛ}$ и $N_{ЭЛ.CP}$, можно найти потери в приводе и фактическую максимальную мощность ДВС.

В среднюю потребную мощность ДВС $N_{ДВС}$ в разных частях входят: средняя мощность, проходящая

по прямой механической передаче – $N_{ПР.CP}$; средняя мощность электрической передачей – $N_{ЭЛ.CP}$. Отсюда следует, что

$$N_{ПР.CP} = N_{CP.ПОЛ} - N_{ЭЛ.CP}, \text{ кВт},$$

или находится как

$$N_{CP.ПОЛ} = \frac{\sum_1^n N_i}{n}, \text{ кВт}, \quad (\sum \text{если } N_i > 0).$$

Потребление мощности от ДВС по прямой ветви с учетом потерь в механической передаче выражается формулой:

$$N_1 = \frac{N_{CP.ПОЛ}}{K \times \eta_{TP}}, \text{ кВт}.$$

Блок-схемы цепочки потерь в механической и электрической передачах показаны на рисунке 2б и 2в соответственно.

Потребление мощности, передаваемой от электродвигателя по параллельной ветви с учетом потерь в электрической передаче, выражается формулой:

$$N_{ЭЛ.CP} = \frac{\sum_1^n (N_i - N_{CP.ПОЛ})}{n}, \text{ кВт},$$

($\sum \text{если } N_i - N_{CP.ПОЛ} > 0$),

где n – количество значений, удовлетворяющих условию $N_i > 0$ (ДВС задействован).

В цепочке электропривода поток электрической энергии при зарядке проходит от генератора к тяговому накопителю энергии и обратно к генератору, работающему в режиме электромотора. Электрическая энергия в параллельной схеме дважды проходит через преобразователь, только после этого передается на электромотор и трансмиссию. С учетом потерь при оптимальном режиме работы двигателя эта мощность будет равна:

$$N_2 = \frac{N_{ЭЛ.CP}}{K \times \eta_{Г} \times 2\eta_{ПР} \times \eta_{БНЭ} \times \eta_{М} \times \eta_{ТР}}, \text{ кВт}.$$

Рекуперированная энергия передается в накопитель, после чего в момент пиковых нагрузок возвращается обратно, дважды проходя через трансмиссию, генератор-мотор, преобразователь энергии (рис. 2г). Мощность, возвращаемая на колеса благодаря рекуперации энергии, находится по следующей формуле

$$N_3 = N_{T.CP} \times \eta_{Р} \times \eta_{ТР}^2 \times \eta_{МГ}^2 \times \eta_{ПР}^2 \times \eta_{НЭ}, \text{ кВт}.$$

Суммарная мощность ДВС рассчитана для стандартного Европейского городского цикла движения автомобиля массой 1500 кг с нормативными техническими параметрами. Максимальная мощность ДВС гибридного привода с параллельной схемой составила

9,116 кВт, что на 88 % больше, чем в последовательной схеме.

Характер условий движения транспортного средства может быть различным, он существенно влияет на выбор типа гибридной схемы. Это может быть повторяющийся цикл с длительными стоянками при $N_i = 0$ (холостой ход ДВС) и резкими пиками возрастания нагрузки, когда $N_i \rightarrow N_{MAX}$. Тогда средняя мощность ГСУ (для параллельной схемы, в виду того что не учитываются интервалы отсутствия мощности) будет стремиться к максимальной мощности $N_{CP.ПОЛ.} \rightarrow N_{MAX}$. Это может быть длительное движение с примерно постоянными значениями потребной мощности, близкой к средней мощности ГСУ с редкими падениями и скачками нагрузки, холостой ход ДВС почти отсутствует $N_i \rightarrow N_{ПОТР.СР}$. В этом случае наиболее эффективна будет параллельная схема комбинированной энергоустановки.

Частным случаем является постоянное значение нагрузки на всем участке движения с очень редкими изменениями нагрузки, при этом $N_i \approx N_{MAX} \approx N_{ПОТР.СР} \approx const$. В этом случае наименьшие потери будут в приводе со стандартной механической трансмиссией

и ДВС. Такой режим движения возможен при длительном движении с большой скоростью по шоссе.

Используя значения удельного расхода топлива, рассчитывается средний приведенный расход топлива для каждого конкретного автомобиля и заданного ездового цикла.

Результаты расчета расхода топлива автомобиля категории N1 показали: средний расход топлива автомобиля с КЭУ параллельной схемы составил 10,8 л/100 км, такого же автомобиля с ДВС 14,4 л/100 км.

На основании данных по расходу топлива, среднегодовому пробегу 50 тыс. км в год, начальной стоимости автомобилей определены границы эффективного использования гибридного автомобиля категории N1 (табл.). Разница в стоимости автомобилей принималась 18 %, затраты на техническое обслуживание и ремонт в расчете не учитывались.

Результаты расчета показывают, что гибридный автомобиль, имеющий более высокую начальную стоимость, эффективно использовать в течение 3–10 лет при ежегодном пробеге не менее 30 тыс. км. в год с учетом продаж по остаточной стоимости в конце периода эксплуатации.

Таблица

Границы эффективного использования гибридного автомобиля категории N1

| Годовой пробег | Общий пробег / Годы эксплуатации | | | | | | | | | |
|----------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | руб./км | | | | | | | | | |
| 10 тыс. км | 10/1 | 20/2 | 30/3 | 40/4 | 50/5 | 60/6 | 70/7 | 80/8 | 90/9 | 100/10 |
| | -34,3 | -25,5 | -18,5 | -14,5 | -11,9 | -9,8 | -8,0 | -6,4 | -5,1 | -3,9 |
| 20 тыс. км | 20/1 | 40/2 | 60/3 | 80/4 | 100/5 | 120/6 | 140/7 | 160/8 | 180/9 | 200/10 |
| | -13,7 | -9,2 | -5,8 | -3,8 | -2,4 | -1,4 | -0,5 | 0,3 | 0,9 | 1,5 |
| 30 тыс. км | 30/1 | 60/2 | 90/3 | 120/4 | 150/5 | 180/6 | 210/7 | 240/8 | 270/9 | 300/10 |
| | -6,8 | -3,8 | -1,5 | -0,2 | 0,7 | 1,4 | 2,0 | 2,5 | 2,9 | 3,3 |
| 40 тыс. км | 40/1 | 80/2 | 120/3 | 160/4 | 200/5 | 240/6 | 280/7 | 320/8 | 360/9 | 400/10 |
| | -3,4 | -1,1 | 0,6 | 1,6 | 2,3 | 2,8 | 3,2 | 3,6 | 3,9 | 4,2 |
| 50 тыс. км | 50/1 | 100/2 | 150/3 | 200/4 | 250/5 | 300/6 | 350/7 | 400/8 | 450/9 | 500/10 |
| | -1,3 | 0,5 | 1,9 | 2,7 | 3,2 | 3,6 | 4,0 | 4,3 | 4,5 | 4,8 |
| 60 тыс. км | 60/1 | 120/2 | 180/3 | 240/4 | 300/5 | 360/6 | 420/7 | 480/8 | 540/9 | 600/10 |
| | 0,1 | 1,6 | 2,7 | 3,4 | 3,8 | 4,2 | 4,5 | 4,7 | 5,0 | 5,1 |
| 70 тыс. км | 70/1 | 140/2 | 210/3 | 280/4 | 350/5 | 420/6 | 490/7 | 560/8 | 630/9 | 700/10 |
| | 1,1 | 2,3 | 3,3 | 3,9 | 4,3 | 4,6 | 4,8 | 5,0 | 5,2 | 5,4 |

* Выделено поле экономической эффективности при эксплуатации.

Литература

1. Раков, В. А. Оценка эксплуатационных свойств автомобилей с комбинированными энергетическими установками / В. А. Раков. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2020. – 240 с.

2. Александров, И. К. Оценка энергетической эффективности ДВС в условиях неустановившегося режима работы / Александров, И. К. Белков, О. Л., Раков, В. А. // Вестник машиностроения. – 2008. – № 6. – С. 17–20.

3. Ефремов, И. С. Теория и расчет тягового привода электромобилей : учебное пособие для вузов / А. П. Пролыгин, Ю. М. Андреев, А. Б. Миндлин – Москва : Высшая школа, 1984. – 383 с.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666519 Российская Федерация. КЭУ-АВТО. Программа для расчета расхода топлива гибридными автомобилями по заданному

циклу движения : № 2023664261 : заявл. 10.07.2023 : опубл. 01.08.2023 / В. А. Раков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет».

5. Автомобильный справочник : перевод с английского. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. – 992 с.

6. Стародубцева, И. В. Исследование тягово-энергетических характеристик гибридной силовой установки автобуса / И. В. Стародубцева, О. Н. Дидманидзе // Грузовик. – 2017. – № 2. – С. 7–11.

7. Раков, В. А. Определение мощности, потребляемой транспортным средством при неустановившихся режимах работы / В. А. Раков, И. К. Александров // Автомобильная промышленность. – 2013. – № 5. – С. 9–11.

V.A. Rakov

ASSESSMENT OF PARALLEL HYBRID ENGINE VEHICLES OPERATING EFFICIENCY

The article provides a method for theoretical determination of the fuel efficiency properties of hybrid vehicles with a parallel layout of the components of a combined power plant for a given driving cycle. A calculation algorithm using the example of a standard NEDC driving cycle as well as the results of calculating fuel consumption and the estimated efficiency of using hybrid vehicles in rubles/km depending on the average annual mileage are presented.

Hybrid car, combined power plant, fuel efficiency, efficiency, calculation algorithm.