

УДК 629.113

## К ВОПРОСУ ВЫБОРА МОЩНОСТИ ДВС ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

В.В. Ломакин, к.т.н. / А.В. Шабанов, к.т.н. / А.А. Шабанов, инж.  
МГМУ «МАМИ», НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ»

Потребление значительного количества топливно-энергетических ресурсов, в том числе и на транспорте, беспокоит учёных всех стран мира, так как приводит к удорожанию нефтяного сырья, снижению добычи нефти, возникновению угрозы энергетического кризиса и негативно влияет на состояние общей экологической обстановки. Ухудшение экологической обстановки обусловлено вредным воздействием на окружающую среду выбросов вредных веществ автотранспортом. Поэтому главной задачей при проектировании автомобилей является улучшение топливной экономичности и снижение количества выбросов вредных веществ. При современном насыщении больших городов автотранспортом всё больше внимания уделяется снижению выбросов  $\text{CO}_2$ , доля которого от всех веществ, участвующих в образовании парникового эффекта, является одной из основных [1, 2].

Ограничение выбросов  $\text{CO}_2$  в отработавших газах в странах ЕС осуществляется Директивой 93/116 ЕС и Правилами № 443 ООН\*, а расчёт выбросов проводится по методике Правил № 101 ООН [3]. Если в 2012 г. автопроизводителям предлагалось снизить долю выбросов  $\text{CO}_2$  до 130–120 г/км, то в 2020 г. – уже до 95 г/км, а к 2050 г. Программой ООН (Global Fuel Economy Initiative) предусмотрено снижение расхода топлива и, соответственно, выбросов  $\text{CO}_2$  автомобилями на 50% по сравнению с нынешним уровнем [1, 2, 4].

Анализ тенденций развития автомобилей показывает, что наиболее перспективным направлением в решении энергетической и экологической проблем может считаться применение комбинированных силовых установок на автомобилях, которые позволяют обеспечить требуемое улучшение энергетических и экологических показателей, в том числе снижение выбросов  $\text{CO}_2$  [1, 6, 7].

Как показывают опубликованные в технической литературе испытательные тесты, гибридная энергоустановка очень эффективна в режиме городского движения, где автомобиль большую часть времени работает на электротяге [5]. Испытательная процедура Правил ООН № 83-06 кроме городского цикла содержит более нагруженный магистральный цикл, где ДВС работает в широком нагрузочном и скоростном диапазоне. Магистральный цикл также содержит режимы малых и средних нагрузок, где можно использовать электротягу энергоустановки. Помимо этого, большое внимание автопроизводители уделяют динамическим и скоростным качествам гибридных автомобилей.

Суммарная мощность гибридной силовой установки (ГЭУ), состоящей из основного двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя, может превышать мощность ДВС автомобиля-аналога. В данном варианте можно получить эффект улучшения динамических качеств гибридного автомобиля за счёт использования тяговой характеристики электродвигателя, имеющего максимальный крутящий момент на низких частотах вращения приводного вала. За счёт уменьшения мощности основного ДВС в общем балансе энергоустановки можно дополнительно получить улучшение экономичности автомобиля.

При проектировании и выборе мощности энергоустановки для гибридного автомобиля может быть поставлено несколько задач, направленных на улучшение топливно-энергетических характеристик автомобиля [6, 7]:

– первая: обеспечение движения автомобиля на электротяге в городском цикле в режимах постоянных скоростей и малых нагрузок в городских условиях, где двигатель большую часть времени работает при малых нагрузках;

– вторая: движение в режимах разгона совместно на ДВС и электродвигателе. Доля данных режимов даёт наибольшее увеличение расхода топлива в испытательном цикле Правил ООН № 83-06 и требует большей мощности;

– третья: сохранение динамических и скоростных качеств гибридного автомобиля при снижении рабочего объёма основного двигателя.

Попробуем в рамках данной статьи проанализировать вышеизложенную проблему и дать количественную оценку снижению расхода топлива автомобиля с ГЭУ за счёт уменьшения рабочего объёма ДВС и, следовательно, его мощности. Топливная экономичность автомобиля в значительной степени определяется скоростными и нагрузочными режимами работы двигателя. Из теории ДВС известно, что режимы малых нагрузок характеризуются низкими значениями механического и индикаторного коэффициента полезного действия двигателя. Это определяется тем, что при малых нагрузках возрастает доля механических потерь в общем энергетическом балансе двигателя. Индикаторный КПД двигателя с искровым зажиганием с уменьшением нагрузки также снижается с 0,35–0,4 до 0,2–0,25. Очевидно, что топливная экономичность автомобиля с ГЭУ может быть существенно улучшена за счёт снижения времени работы ДВС в этих режимах. Выигрыш в топливной экономичности при снижении литража ДВС тем выше, чем ниже нагрузка на двигатель.

В научной литературе приводятся результаты практической реализации концепции использования ДВС с меньшим рабочим объёмом при малых нагрузках и подключением дополнительной мощности ДВС в режиме разгона и больших нагрузок. В середине 80-х гг. прошлого века отечественные и зарубежные исследователи уделяли большое внимание системам отключения цилиндров и установке на автомобили модульных ДВС. Эти работы проводились на стадии экспериментальных и патентных исследований в России (НАМИ), Японии и других странах. Так, в исследовательской работе [8], проведённой в НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ», рабочий объём ( $V_h$ ) 6-литрового восьмицилиндрового двигателя грузового автомобиля был уменьшен до 3 л. методом удаления четырёх поршней из блока цилиндров. При этом было получено улучшение эксплуатационной топливной экономичности автомобиля при малых нагрузках до 25%. Такой же результат был получен и на легковом автомобиле, у которого двигатель с искровым зажиганием и рабочим объёмом 2,4 л. был заменён на модульную силовую установку из двух двигателей. Двигатели с рабочим объёмом 1,1 л. были установлены на автомобиле последовательно, с возможностью отключения одного из них. Сравнительные испытания автомобиля при работе с одним двигателем в городском цикле показали снижение расхода топлива до 30% [8]. Однако просто замена одного двигателя большего рабочего объёма на двигатель меньшего объёма не позволяет получить максимального эффекта в топливной экономичности, так как при этом не учитываются другие характеристики, например такие, как различие в номинальных

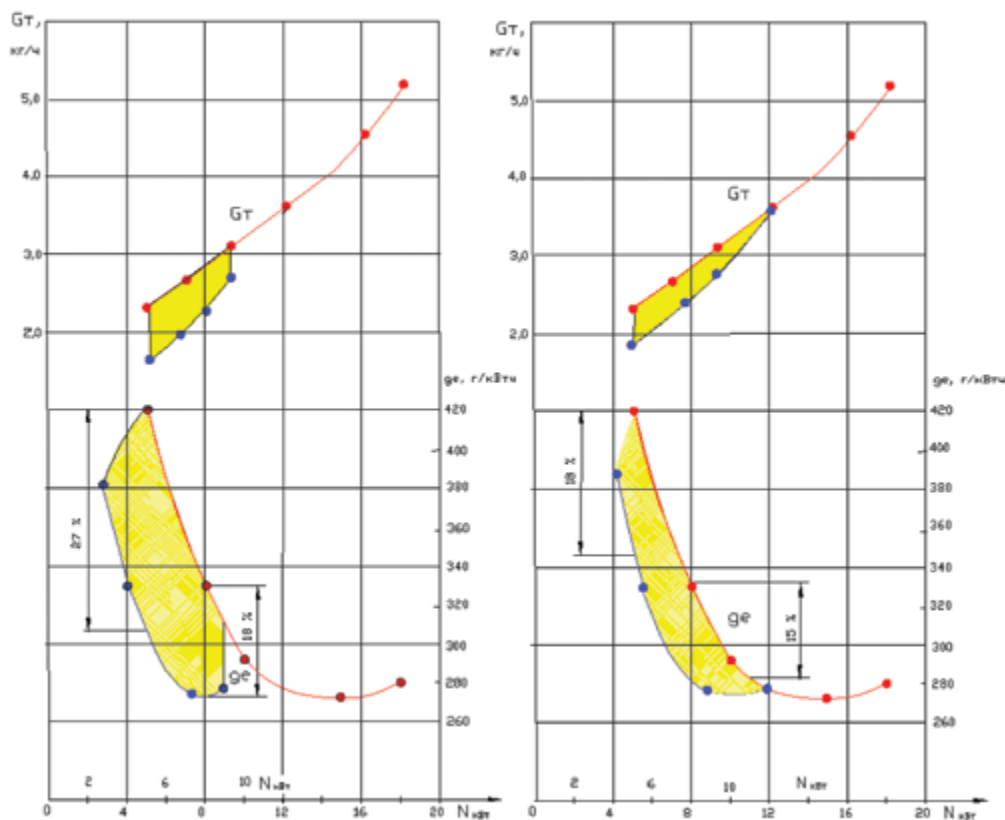
частотах двигателя и расположение максимального крутящего момента по частоте вращения коленчатого вала. Под эту характеристику подбираются параметры трансмиссии автомобиля с целью обеспечить работу двигателя в зоне минимального эффективного расхода топлива ( $g_e$ ). Как пример: с целью подбора двигателя для гибридной силовой установки для автомобиля ГАЗ-2705 «Газель» в работе [9] были проведены сравнительные испытания в городском цикле с различными двигателями ЗМЗ-4062.10 ( $V_h = 2,3$  л.) и ВАЗ-2112 ( $V_h = 1,5$  л.). Сравнительную оценку авторы провели по четырём нагрузочным режимам на разных передачах. Эффект снижения расхода топлива (20%) был получен только на первой передаче при минимальной нагрузке. Двигатель ЗМЗ-4062.10 по организации рабочего процесса превосходит ВАЗ-2112, имея относительно высокий уровень форсирования по частоте вращения и более широкую в скоростном и нагрузочном диапазоне зону минимальных  $g_e$ , поэтому ожидаемый эффект по топливной экономичности не был получен. Автомобили фирмы Toyota с бензиновыми ДВС одного класса с рабочим объёмом 1,6–1,8 л. имеют на 18% меньший расход топлива в испытательных циклах, чем автомобили той же фирмы литражом 3,5 л. При меньшей разнице в рабочих объёмах – 2,5 л. и 3,5 л. – соотношение в расходе топлива у автомобилей составляет 12% [5]. Следует заметить, что форсировка по мощности дизельных двигателей за счёт совершенствования системы наддува даёт существенную прибавку в топливной экономичности, так как в данном случае доля механических потерь в общем энергетическом балансе форсированного ДВС значительно меньше, чем у обычного двигателя.

В табл. 1 представлены некоторые характеристики гибридных автомобилей и их бензиновых аналогов, показан эффект снижения расхода топлива при применении ГЭУ, а также уровень выбросов  $CO_2$ .

Анализ эксплуатационных характеристик гибрида Honda Insight и его бензинового аналога Honda Inspire показывает, что рациональный выбор рабочего объёма ДВС энергоустановки и оптимальное использование электродвигателя в различных режимах позволяют снизить расход топлива до 51% в смешанном европейском цикле [5]. Значительная часть экономии топлива была достигнута за счёт уменьшения литража ДВС с  $V_h = 3,47$  л. до  $V_h = 1,34$  л. и снаряжённой массы автомобиля. При этом суммарная мощность энергоустановки составила 72 кВт при мощности электродвигателя 10 кВт. Относительно аналога мощность была снижена более чем в два раза, максимальная скорость гибридного автомобиля составила 186 км/ч, а время разгона до 100 км/ч – 12,6 с.

Таблица 1. Характеристики автомобилей с бензиновыми ДВС и комбинированными энергоустановками

Автомобили	Масса, кг	Литраж ДВС, л	Мощность ДВС, кВт	Мощность электро-двигателя, кВт	Расход топлива л/100 км в европейских циклах (EU)	Снижение расхода топлива гибридом, %	CO <sub>2</sub> , г/км
Honda Civic (гибрид)	1249 1720	1,34	70	15	EU 5,2/4,3/4,6	59/46/49	109
Honda Civic (аналог)	1265 1700	2,0	148	-	EU 12,7/7,9/9,1	-	215
Toyota Corolla (гибрид)	1380 1805	1,8	73	60	EU 3,8/3,8/3,8	56/31/24	89
Toyota Corolla (аналог)	1250 1750	1,8	108	-	EU 8,7/5,5/6,7	-	155
Honda Insight (гибрид)	1200 1650	1,34	65	10	EU 4,2/4,6/4,4	-/-/51	101
Honda Inspire (аналог)	1610	3,47	206	-	EU -/-/9,0	-	
BMW 7 (гибрид)	2045 2635	4,4	330	15	EU 12,6/7,6/9,4	26/15/21	219
BMW 7 (аналог)	1945 2575	4,4	300	-	EU 17,1/8,9/11,9	-	279
Porsche Cayenne (гибрид)	2240 2910	3,0	245	34	EU 8,7/7,9/8,2	45/6,0/27	193
Porsche Cayenne (аналог)	1995 2765	3,6	220	-	EU 15,9/8,4/11,2	-	263
Cadillac Escalade (гибрид)	2780 3400	6,0	248	60	EU 11,6/10,7/11,0	42/5,0/24	264
Cadillac Escalade (аналог)	2580 3310	6,2	301	-	EU 20,1/11,3/14,5	-	339

Рисунок 1. Эффективный ( $g_e$ ) и часовой расход топлива ( $G_T$ ) ДВС при снижении мощности уменьшением  $V/h$

На гибридном автомобиле Toyota Camry со снаряжённой массой 1670 кг и двигателем, имеющим рабочий объём 2,36 л., было получено значительно меньшее снижение расхода топлива: 36% в городском цикле и 24% – в смешанном относительно бензинового аналога Toyota Camry, имеющего рабочий объём 2,5 л. Скоростные качества автомобилей не изменились и составили 180 км/ч [5].

Следует отметить, что эффект снижения расхода топлива больший у тех гибридов, которые могут использовать при работе в циклах в течение большего времени электродвигатель и где основной ДВС работает на режимах с высокими значениями коэффициента полезного действия, а также где используется меньший рабочий объём ДВС при одинаковой суммарной мощности силовой установки на автомобиле.

Наиболее точно количественный эффект от снижения рабочего объёма двигателя можно установить, определив на испытательном моторном стенде серию нагрузочных характеристик на различных частотах работы ДВС. В этом случае учитываются только мощностные и экономические характеристики силового агрегата. Нагрузочные характеристики двигателя перестраиваются с учётом заданного уровня снижения мощности от уменьшения рабочего объёма. На рис. 1 приведена нагрузочная характеристика ДВС с  $V_h = 1,5$  л. при частоте вращения коленчатого вала двигателя  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>. Этот скоростной режим наиболее часто используется на легковых автомобилях в городском испытательном цикле. Левый график соответствует варианту 50%-го, правый – 33%-го снижения. Принцип перестраивания нагрузочных характеристик заключается в следующем. Например, при 50%-м снижении мощности ДВС точка эффективного расхода топлива  $g_e = 280$  г/кВт\*ч, соответствующая полной нагрузке ( $Ne = 18$  кВт), перемещается по нагрузочной характеристике влево до значения  $Ne = 9$  кВт. Другие промежуточные точки нагрузочной характеристики пересчитываются и перестраиваются с учётом снижения мощности таким же образом. Затем рассчитывается значение часового расхода топлива по формуле  $G_T = (g_e * Ne) / 10^3$ . Эффект снижения расхода топлива ДВС можно рассчитать исходя из нагрузки, которая определяется режимами работы ДВС на отдельных этапах испытательного цикла. Сравнительные нагрузочные характеристики ДВС с выбранными значениями мощности показывают, что в первом случае можно получить от 18 до 27% снижения часового и эффективного расхода топлива, а во втором – от 15 до 18% (на средних нагрузках рабочего диапазона ДВС).

Проведённый сравнительный анализ эксплуатационных характеристик автомобилей показал, что

при уменьшении только рабочего объёма ДВС гибридного автомобиля и соответствующем подборе мощности электродвигателя можно получить снижение расхода топлива от 12 до 36% в европейских испытательных циклах. Предложенная методика расчёта по нагрузочным характеристикам позволяет более точно определить эффект улучшения топливной экономичности при заданном уменьшении рабочего объёма ДВС уже на стадии проектирования гибридного автомобиля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гусаров А.П. Потребление топлива и выбросы CO<sub>2</sub> автомобиля // Журнал ААИ. – 2009. – № 3 (56).
2. Вайсблум М.Е. Европейский подход к снижению CO<sub>2</sub> // Журнал ААИ. – 2010. – № 3 (62). – С. 59.
3. Вайсблум М.Е. Новые тенденции в развитии требований ЕЭК ООН в отношении экологических показателей АТС и устанавливаемых на них двигателей // Журнал ААИ. – 2011. – № 3 (68). – С. 14–19.
4. Системные решения Bosch по сокращению выбросов CO<sub>2</sub> и других компонентов / У. Радмахер, Й. Вагнер, Б. Менхер, Ш. Кельер // Журнал ААИ. – 2011. – № 4 (69).
5. Automobil Revue: каталоги автомобилей. – 2006–2011.
6. Ломакин В.В., Карпунин К.Е., Кондрашов В.Н. Тенденции развития автомобилестроения: учебное пособие. – М.: МГТУ «МАМИ», 2008.
7. Автомобили с гибридной силовой установкой: учебное пособие для вузов / С.В. Бахмутов, В.В. Селифонов, В.В. Ломакин и др. – М.: МГТУ «МАМИ», 2009. – 136 с.
8. Кутенев В.Ф., Кисуленко Б.В., Шюте Ю.В. Экологическая безопасность автомобилей с двигателями внутреннего сгорания. Экология. Машиностроение. – М., 2009. – С. 253.
9. О ДВС для комбинированной энергетической установки / Л.Н. Вахошин, В.В. Карницкий, И.М. Минкин и др. // Автомобильная промышленность. – 2007. – № 5.