

УДК. 629.113

В.В. Ломакин, А.А. Шабанов

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ГИБРИДНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Университет машиностроения (МАМИ), Москва

Рассмотрены критерии выбора параметров силовой установки и проблемы, с которыми сталкиваются зарубежные и отечественные производители гибридных автомобилей.

Ключевые слова: силовая установка, гибридные автомобили, статистические коэффициенты.

Для легковых автомобилей максимальную мощность двигателя обычно выбирают исходя из обеспечения максимальной скорости на дороге. Максимальная скорость достигается на высшей передаче. Максимальная скорость и мощность заявляются производителем в техническом описании на транспортное средство, и проверяется при сертификационных испытаниях. Двигатель также должен обеспечивать хорошие динамические качества автомобилю при обгонах на дороге. Динамические качества автомобиля зависят от величины максимального крутящего момента двигателя и его расположения на внешней скоростной характеристике.

Составляющие дорожной нагрузки определяют мощность двигателя. Если построить в графическом виде суммарную мощность сопротивления движения автомобиля в функции скорости и мощность двигателя в тех же координатах, то пересечение мощностей определит значение максимальной скорости. Расчеты по составляющим входящим в уравнения движения автомобиля показывают, что наибольшее значение на мощность влияют потери при разгоне. Мощность при определенной массе автомобиля и моменте его инерции определяется величиной ускорения и конечной скоростью разгона. Завышенная мощность и, соответственно рабочий объем двигателя, у обычного автомобиля позволяют иметь достаточно интенсивную разгонную характеристику и большую максимальную скорость автомобилю, но это приводит к существенному увеличению расхода топлива, не только на режимах максимальных нагрузок, но и на малых нагрузках. У гибридного автомобиля используют ДВС меньшей мощности, так как силовая установка включает еще и электродвигатель, при этом суммарная мощность силовой установки не меньше, чем у обычного автомобиля. Но за счет использования электротяги расход топлива у гибридного автомобиля существенно меньше, чем у обычного автомобиля. Мощность электродвигателя линейно растет с ростом скорости, поэтому динамика гибридного автомобиля не уступает другим автомобилям.

При проектировании гибридного автомобиля и выборе мощности на первом этапе удобно использовать статистические данные автомобильных каталогов. Анализ параметров силовых установок гибридных автомобилей (HEV) показывает, что суммарная мощность энергоустановки, как правило, выбирается несколько меньшей или равной мощности ДВС, установленного на автомобиле аналоге. Это дает определенный результат снижения расхода топлива на гибридном автомобиле [1, 2]. Под аналогом понимается традиционный бензиновый автомобиль того же производителя и класса. По статистическим коэффициентам в первом приближении выбрать параметры силовой установки.

Энергетические параметры силовой установки можно в первом приближении выбрать по статистическим критериям (коэффициентам). Для этого можно использовать статистическую информацию о мощностных параметрах различных моделей гибридных автомобилей, имеющуюся в технической литературе [3, 4]. Коэффициент $k_1 = N_{эл}/N_{двс}$, приведенный табл. 1, характеризует отношение мощностей электродвигателя и ДВС гибридных автомо-

билей. Для анализа статистических данных, характеризующих энергетические параметры силовых установок по различным моделям гибридных автомобилей удобно рассматривать изменение коэффициента k_1 и других параметров силовых установок в зависимости от рабочего объема (V_h) поршневых двигателей, так как V_h влияет на мощность и топливную экономичность силовой установки гибридного автомобиля.

На рис. 1 показаны статистические данные коэффициента k_1 различных гибридных автомобилей. Значение коэффициента k_1 для разных гибридных автомобилей изменяется в широких пределах от 0,0045 (BMW 7) и 0,073 (Mercedes-Bens S400) до 0,95 (Toyota Camry). Наименьшее значение коэффициента k_1 имеют модели автомобилей с 15 кВт электродвигателями и большим рабочим объемом ДВС, а наибольшее – автомобиль Toyota Camry с 105 кВт электродвигателем и небольшим рабочим объемом ДВС равным 1,36 л. Следует отметить, что большое значение коэффициента k_1 еще не является гарантией достижения низкого расхода топлива автомобилем. Так, у автомобиля Hyundai Sonata с 30 кВт электродвигателем ($k_1=0,24$) расход топлива ниже в испытательных американских циклах EPA относительно бензинового аналога, чем у Ford Escape с 70 кВт электродвигателем ($k_1=0,61$). Это также характерно и для гибрида Toyota Camry и для других моделей. Если у автомобиля Hyundai Sonata снижение расхода топлива составляет 45% в городском цикле и 29% в смешанном цикле, то у второго автомобиля 36% и 18% соответственно, а у третьего 36% и 24%.

У гибридных автомобилей Honda Insight и Honda Civic с 10 и 15 кВт электродвигателями коэффициент k_1 также имеет низкие значения 0,15 и 0,23. Однако на этих гибридных автомобилях получено значительное снижение расхода топлива относительно аналогов. Данный результат достигнут в определенной степени благодаря тому, что у данных моделей автомобилей рабочий объем ДВС был снижен относительно аналога Honda Civic с 2,0 л до 1,34 л, при этом мощность основного двигателя была также снижена со 148 кВт до 65 и 70 кВт соответственно. Принятое решение позволило значительно уменьшить расход топлива в испытательных циклах.

Сравнительная оценка топливной экономичности гибридных автомобилей относительно аналогов приведена в табл. 1. Для сравнения эффективности работы силовых установок гибридных автомобилей снижение расхода топлива по испытательным американским федеральным циклам EPA и европейским EU показано в процентах. Там же приведены значения коэффициента k_1 энергетической установки и показатели топливной экономичности гибридных автомобилей.

Коэффициенты, характеризующие другие энергетические параметры силовой установки, такие, как соотношение крутящих моментов ДВС и электродвигателя, суммарной мощности силовой установки и полной массы автомобиля, рассчитанные по данным каталогов [3], приведены в табл. 2. Коэффициент $k_2 = M_{кэл} / M_{кд}$, характеризующий соотношение величин крутящих моментов электродвигателя и ДВС, находится у обычных гибридов (HEV) в пределах 0,65-1,46.

Максимальное значение $k_2=2,8$ имеет силовая установка нового типа (PHEV) гибридного автомобиля Chevrolet Volt с 55 кВт электромотором. Данный автомобиль имеет также на порядок более мощную, чем у обычных гибридов литий-ионную батарею с энергоемкостью 16 кВтч и имеет возможность подзарядки ее от электросети, что позволяет ему проехать расстояние на одной зарядке 61 км. Силовая установка данных автомобилей вследствие специфики их работы заслуживает отдельного рассмотрения. Следует отметить, что в последние годы с бурным развитием автомобильного парка обычных гибридов (HEV), появились необычные гибриды (PHEV) Chevrolet Volt, Toyota Prius Plug-in, и др. Эти гибриды отличаются тем, что их можно подзаряжать от электросети (plug-in hybrid vehicle – подзаряжаемый гибридный автомобиль). Они максимально используют электрическую тягу, а если батарея разрядилась, переходят на тягу от ДВС. Для подзарядки используется обычная электросеть или используются специальные зарядные устройства.

Третий коэффициент $k_3 = N_{двс} / N_{\Sigma}$ характеризует соотношение мощности ДВС к сум-

марной мощности силовой установки и находится в пределах 0,73-0,9. Гибридный автомобиль Chevrolet Volt имеет наименьшее значение $k_3=0,57$. Коэффициент $N1=N_{\Sigma}/m_{\Sigma}$ характеризует соотношение суммарной мощности силовой установки к полной массе автомобиля и находится в пределах 0,044-0,096. Наибольшее значение $N1$ имеют скоростные гибридные автомобили, такие как Porsche Cayenne. Автомобиль имеет максимальную скорость 242 км/ч и высокие динамические качества, разгон с места до 100 км составляет 6,5 с.

Таблица 1

Влияние коэффициента k_1 на снижение расхода топлива гибридных автомобилей относительно аналогов в испытательных циклах

№	Автомобиль	$k_1=N_{эл}/N_{двс}$, кВт/кВт	Расход топлива в испытательном цикле, л/100 км	Снижение расхода топлива относительно аналога, %
1	Toyota Corolla (гибрид)	0,82	EU 3,8/3,8/3,8	56/31/43
2	Toyota Corolla (впрыск бен.)	-	EU 8,7/5,5/6,7	-
3	Toyota Camry (гибрид)	0,95	EPA 6,9/7,1/6,9	36/ - /24
4	Toyota Camry (впрыск бен.)	-	EPA 10,7/7,3/9,1	-
5	Hyundai Sonata (гибрид)	0,24	EPA 6,4/6,0/6,2	45/ - /29
6	Hyundai Sonata Fe (впрыск бен.)	-	EPA 11,7/6,9/8,7	-
7	Ford Escape (гибрид)	0,61	EPA 7,6/6,9	36/18
8	Ford Escape (впрыск бен.)	-	EPA 11,8/8,4	-
9	Lexus RX (гибрид)	0,67	EPA 7,3/8,4/7,8	49/ - /26
10	Lexus RX 350 (впрыск бен.)	-	EPA 14,3/8,4/10,6	-
11	Mercedes-Bens S400(гибрид)	0,073	EU 10,8/6,4/4,8	0/ - /41
12	Mercedes-Bens S350 (впрыск бен.)	-	EU 10,8/6,5/8,1	-
13	Cadillac Escalade (гибрид)	0,24	EU 11,6/10,7/11,1 EPA 11,8/10,2	41 /5/24 54/22
14	Cadillac Escalade (впрыск бен.)	-	EU 20,1/11,3/14,5 EPA 18,1/13,1	-
15	Porsche Cayenne (гибрид)	0,139	EU 8,7/7,9/8,2	45/6/27
16	Porsche Cayenne (впрыск бен.)	-	EU 15,9/8,4/11,2	-
17	BMW 7 (гибрид)	0,045	EU 12,6/7,6/9,4	26/15/21
18	BMW 7 (впрыск бен.)	-	EU 17,1/8,9/11,9	-

Анализ эксплуатационных характеристик гибрида Honda Insight и его бензинового аналога Honda Inspire показывает, что рациональный выбор рабочего объема ДВС энергоустановки и оптимальное использование электродвигателя на различных режимах, позволяет снизить расход топлива на 36% в смешанном европейском цикле [3, 4]. Значительная часть

экономии топлива была достигнута за счет уменьшения литража ДВС с 3,47л до 1,34л и уменьшения снаряженной 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.

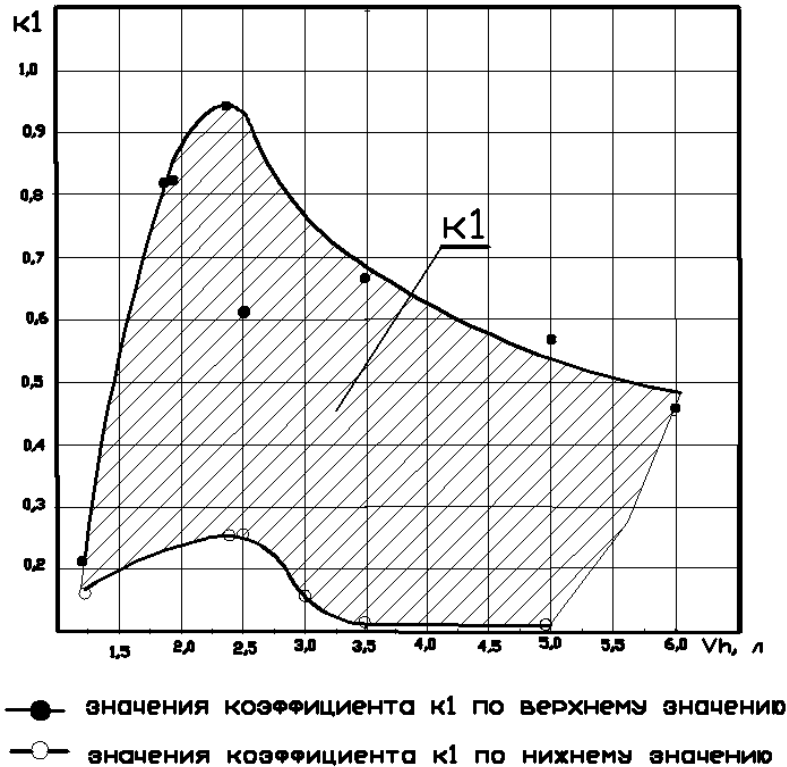


Рис. 1. Значение коэффициента k_1 в зависимости от рабочего объема ДВС у различных гибридных автомобилей

Мощность электродвигателя линейно растет с ростом скорости, поэтому динамика гибридного автомобиля не уступает традиционным автомобилям. Автомобили фирмы Toyota с бензиновыми ДВС одного класса с рабочим объемом 1,6 - 1,8 л имеют на 18% меньший расход топлива в испытательных циклах, чем автомобили той же фирмы литражом 3,5 л.

Коэффициент $K_1 = N_{эл}/N_{двс}$, приведенный в табл. 1, характеризует отношение мощностей электродвигателя и ДВС гибридного автомобиля. Значение коэффициента K_1 для гибридных автомобилей изменяется в широких пределах от 0,073 до 0,95. Оптимальное соотношение мощностей основных источников тягового усилия от ДВС и электродвигателя, а также энергоемкости и мощности накопителя энергии зависит от того, в каких режимах движения будет эксплуатироваться гибридный автомобиль.

Коэффициент k_2 характеризует соотношение величин крутящих моментов электродвигателя и ДВС, $k_2 = M_{кдвс}/M_{кэл}$ и находится в пределах 0,69-3,1. Коэффициент k_3 характеризует соотношение мощностей ДВС и суммарной мощности силовой установки $k_3 = N_{двс}/N_{\Sigma}$. Коэффициент N_1 характеризует соотношение суммарной мощности силовой установки к полной массе автомобиля $N_1 = N_{\Sigma}/m_{\Sigma}$ (кВт/кг) и находится в пределах 0,039-0,125. Коэффициенты, характеризующие энергетические параметры силовой установки, такие как соотношение крутящих моментов ДВС и электродвигателя, мощностей ДВС и электродвигателя, суммарной мощности силовой установки по отношению к полной массе автомобиля приведены также в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики автомобилей с бензиновыми ДВС и с комбинированными энергоустановками

Автомобили	Масса, кг	Литраж ДВС, л	Мощность ДВС, кВт (пном) / $N1=N_{двс}/m\Sigma$	Крутящий момент ДВС, Нм (при $M_k \text{ max}$)	Мощность электро-двигателя, кВт (при $M_k \text{ max}$) $K1= N_{эл}/ N_{двс}$	Крутящий момент электро-двигателя, Нм $K2=M_{кдвс}/M_{кэл}$	Суммарная мощность сил.установ, кВт/Нм $K3=N_{двс}/N\Sigma$	Расход топлива л/100км	CO2	V, км/ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Toyota Corolla (впрыск бен.)	1250 1750	1,8	108(6400)	180(4000)	-	-	-	EU 8,7/5,5/6,7	155	
Toyota Corolla (гибрид)	1380 Σ 1805	1,8	73(5200)/ /0,04	142(4000)	60/0,82	207/0,69	100/0,73	EU 3,8/3,8/3,8	89	
Toyota Camry (впрыск бен.)	1500	2,5	125(6000)	233(4000)	-	-	-	EPA 7,6/11,2 10,7/7,3/9,1		180
Toyota Camry (гибрид)	1670	2,36	110 (6000)	187 (4400)	105 /0,95	270/0,69	139/0,79	EPA 6,9/7,1/6,9 7,6/6,7/7,1	92	180
Toyota Prius (гибрид)	1370 Σ 1805	1,8	73 (5200) /0,04	142 (4000)	60 /0,82	207/0,69	100/0,73	EU 3,9/3,7/3,9 EPA 6,2/5,6/5,9	89 92	180
Nissan Altima (впрыск бен.)	1350 1485	2,5	128 (5600)	245 (3900)	-	-	-	EPA 7,6/10,2/8,8		
Nissan Altima (гибрид)	1575 Σ 2055	2,5	116 (5200) /0,056	220 (2800)	30/0,26	270/0,81	148/0,78	EPA 7,1/6,7		
Honda Crossrad (впрыск бен.)	1410 1480	1,8	103(6300)	175 (4300)	-	-	-	8,6		
Honda Insight (впрыск бензина)	1610	3,47	206(6200)	340 (5000)	-	-	-	9,0		
Honda Insight (гибрид)	1200- Σ 1650	1,34	65 (5800) /0,039	121 (4500)	10/0,15	79/0,65	72 /0,9	EU 4,2/4,6/4,4	101	182
Honda Civic (впрыск бен.)	1265 1700	2,0	148(7800)	195(5600)	-	-	-	EU 12,7/7,9/9,1	215	235
Honda CR-Z (гибрид)	1200 Σ 1520	1,5	84(6100) /0,055	145(4800)		174/0,83	91/0,92	EU 6,1/4,4/4,5	117	200
Honda Civic (впрыск бен.)	1195 1220	1,8	103 (6300)	175 (4300)	-	-	-	EPA 8,1		
Honda Civic (гибрид)	1249 Σ 1720	1,34	70 (6000) /0,041	123 (4600)	15/0,23	103/1,19	8,4/0,83	EU 5,2/4,3/4,6	109	185

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Mercedes-Bens S350 (впрыск бен.)	1835 2505	3,5	225(6500)	370(3500)	-	-	-	EU 10,8/6,5/8,1	189	
Mercedes-Bens S400(гибрид)	1880 Σ2550	3,5	205(6000) /0,080	350 (3500-5500)	15/0,073		220/0,93	EU 10,8/6,4/4,8	188	
Hyundai Sonata (впрыск бен.)	1725 2505	2,35	128(6000)	126(3750)	-	-	-	EPA 11,7/6,9/8,7		190
Hyundai Sonata (гиб- рид)	1515	2,36	126(6000)	212(4250)	30/0,24		156/0,81	EPA 6,4/6,0/6,2		
BMW 7 (впрыск бен.)	1945 2575	4,4	300(5500)	600 (1700-4500)	-	-	-	EU 17,1/8,9/11,9	278	
BMW 7 (гибрид)	2045 Σ2635	4,4	330(5500) /0,125	650 (2000-4500)	15/0,045	210/3,1		EU 12,6/7,6/9,4	219	
Ford Escape (впрыск бен.)	1495	2,5	127(6000)	232(4500)	-	-	-	EPA 11,8/8,4 12,4/9,4		180
Ford Escape (гибрид)	1665 Σ1735	2,5	115(6000) /0,066	184(4500)	70/0,61		132/0,87	EPA 8,7/7,8/8,1 7,6/6,9		170
Lexus LS 460 (впрыск бен.)	1945 2495	4,6	280(6400)	493(4100)	-	-	-	EU 17,2/8,4/11,6	261	
Lexus LS 600h (гиб- рид смеш.)	2270 Σ2400	5,0	290 (6400) /0,12	520(4000)	165/0,57	300/1,73	327/0,89	EU 11,2/8,0/9,3	218	
Lexus RX 350 (впрыск бен.)	1895 2545	3,5	204(6200)	346(4700)	-	-	-	EPA 14,3/8,4/10,6	250	
Lexus RX (гибрид)	2045 Σ2560	3,5	183(6000) /0,071	317(4800)	123/0,67	333/0,95	219/0,83	EPA 7,3/8,4/7,8 EU 6,6/6,0/6,3	148	
Porsche Cayenne (впрыск бен.)	1995 2765	3,6	220(6300)	400(3000)	-	-	-	EU 15,9/8,4/11,2	263	
Porsche Cayenne (гибрид)	2240 Σ2910	3,0	245(6500) /0,084	440 (3000-5250)	34/0,139	300/1,47	279/0,87	EU 8,7/7,9/8,2	193	
Ford Fusion (впрыск бен.)	1490 1515	2,5	130(6000)	233(4500)				EPA 10,2/7,1/8,7		180
Ford Fusion (гибрид)	1665	2,5	116(6000)	185(2250)	30/0,26		143/0,81	EPA 6,5/5,7/6,3		180

На рис. 2 приведены статистически данные коэффициента κ_3 и N_1 по гибридным автомобилям.

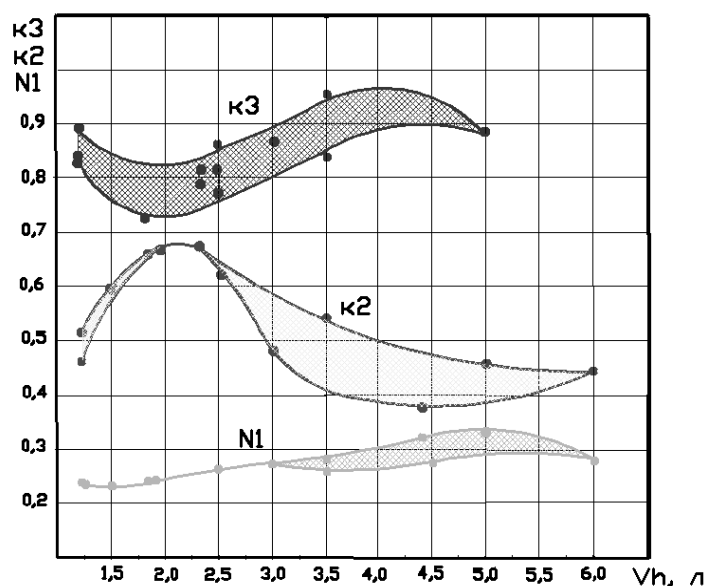


Рис. 2. Коэффициенты κ_2 , κ_3 и N_1 , характеризующие энергетические параметры силовой установки

Таким образом, определяющую роль в снижении расхода топлива автомобилем играет не сама по себе выбранная мощность электродвигателя силовой установки, а другие ее характеристики, такие, как алгоритм работы энергоустановки, определяющий режим включения электродвигателя на различных режимах движения автомобиля, а также конструктивные особенности силовой установки, позволяющие работать ДВС в оптимальной зоне многопараметрической характеристики ДВС. Но при этом необходимо отметить, что для реализации оптимального с точки зрения экономичности алгоритма необходима определенная мощность электродвигателя, которая обеспечивает работу на электротяге в широком диапазоне нагрузок городского и магистрального цикла. Исходя из приведенных статистических данных, можно на первом этапе проектирования гибридного автомобиля выбрать соотношение мощностей его силовых агрегатов.

Библиографический список

1. Загарин, Д.А. Плюс электропривод / Д.А. Загарин [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение. 2013. № 9–10.
2. Ломакин, В.В. К вопросу выбора мощности ДВС энергетической установки гибридных автомобилей / В.В. Ломакин, А.В. Шабанов, А.А. Шабанов // Журнал автомобильных инженеров. ААИ. – 2013. – № 1 (78). – С. 26–29.
3. Каталоги автомобилей 2012–2015 г. Automobil revue.
4. Electric & Hybrid Vehicle Technology International. 2010–2015.

Дата поступления
в редакцию 18.05.2016

V.V. Lomakin, A.A. Shabanov

SELECTION CRITERIA OF THE MAIN PARAMETERS OF HYBRID CARS POWERTRAIN IN THE DESIGN

Moscow state university of mechanical engineering (MAMI)

The selection criteria of the powertrain parameters and problems faced by foreign and domestic manufacturers of hybrid cars were considered.

Key words: powertrain, hybrid car, static coefficient.