

УДК 629.113

## К ВОПРОСУ ВЫБОРА МОЩНОСТИ И АЛГОРИТМА РАБОТЫ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

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

А.В. Шабанов, к.т.н. / НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ»

Одним из главных вопросов, которые стоят перед разработчиками при проектировании гибридного автомобиля, является выбор мощности силовых агрегатов комбинированной энергоустановки. Исходя из имеющейся в технической литературе информации [1, 2], можно сделать вывод, что у западных специалистов нет единого подхода к этому вопросу, о чём свидетельствуют различия в выборе мощности электроустановок и применяемых конструкторских решениях, а также различные полученные результаты по топливной экономичности на разработанных образцах гибридных автомобилей. Также отсутствуют критерии, по которым можно выбрать параметры и тип силовой установки при проектировании. Информация передовых западных фирм по указанному вопросу носит рекламный характер, а описания технических решений не содержат подробных экспериментальных сведений и теоретических выкладок. Всё это в значительной мере сдерживает разработку образцов отечественных гибридных автомобилей. Поэтому следует проанализировать параметры энергоустановок различных гибридных автомобилей по данным, имеющимся в технических литературных источниках, чтобы определить критерии, позволяющие сделать выбор оптимальной мощности их силовых агрегатов.

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 [2, 3]. Как было показано ранее, это даёт определённый результат снижения расхода топлива на гибридном автомобиле [4]. Под аналогом понимается традиционный бензиновый автомобиль того же производителя и класса. Коэффициент  $\kappa_1 = N_{эл} / N_{ДВС}$ , приведённый в табл. 1, характеризует отношение мощностей электродвигателя и ДВС гибридных автомобилей. Для анализа статистических данных, характеризующих энергетические параметры силовых установок по различным моделям гибридных автомобилей, удобно рассматривать изменение коэффициента  $\kappa_1$  и других показателей силовых установок в зависимости от рабочего объёма поршневых двигателей ( $V_h$ ), так как  $V_h$  влияет на мощность и топливную экономичность силовой установки гибридного автомобиля. На рис. 1 показаны статистические данные коэффициента  $\kappa_1$  различных гибридов.

Значение коэффициента  $\kappa_1$  для разных гибридных автомобилей изменяется в широких пределах: от 0,0045 (BMW 7) и 0,073 (Mercedes-Benz S400) до 0,95 (Toyota Camry). Наименьшее значение коэффициента  $\kappa_1$  имеют модели автомобилей с электродвигателями 10 и 15 кВт и большим рабочим объёмом ДВС, а наибольшее — Toyota Camry с электродвигателем 105 кВт и небольшим рабочим объёмом ДВС, равным 1,36 л. Следует отметить, что большое значение коэффициента  $\kappa_1$  ещё не является гарантией достижения низкого расхода топлива автомобилем. Так, например, у Hyundai Sonata с электродвигателем 30 кВт ( $\kappa_1 = 0,24$ ) расход топлива ниже в испытательных циклах ЕРА относительно бензинового аналога, чем у Ford Escape с электродвигателем 70 кВт ( $\kappa_1 = 0,61$ ). Это также характерно для гибрида Toyota Camry и других моделей. Если у Hyundai Sonata снижение расхода топлива составляет 45 % в городском цикле и 29 % — в смешанном, то у второго ТС — 36 % и 18 % соответственно, а у третьего — 36 % и 24 %.

У гибридных автомобилей Honda Insight и Honda Civic с электродвигателями 10 и 15 кВт коэффициент  $\kappa_1$  также имеет низкие значения: 0,15 и 0,23. Однако на этих гибридных автомобилях получено значительное снижение расхода топлива относительно аналогов. Такой результат достигнут в определённой степени

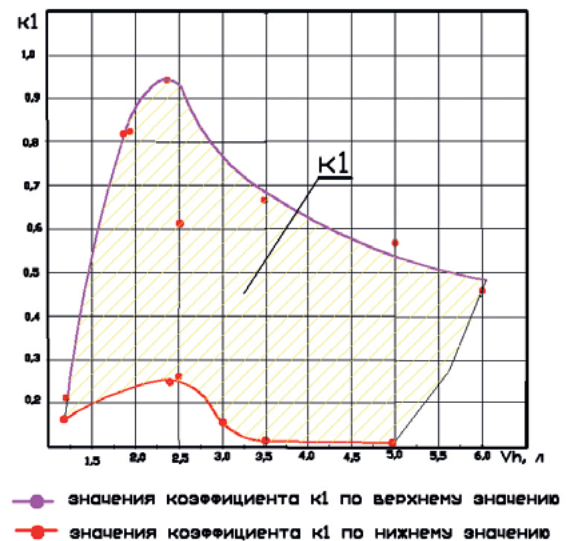


Рисунок 1. Значение коэффициента  $\kappa_1$  в зависимости от рабочего объёма ДВС у различных гибридных автомобилей

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 Santa 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-Benz S400 (гибрид)	0,073	EU 10,8/6,4/4,8	0/–/41
12	Mercedes-Benz 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	0,41/0,05/0,24 0,54/0,22
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	0,45/0,06/0,27
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	0,26/0,15/0,21
18	BMW 7 (впрыск бен.)	–	EU 17,1/8,9/11,9	–

благодаря тому, что у данных моделей рабочий объем ДВС был снижен относительно аналога Honda Civic с 2,0 до 1,34 л, при этом мощность основного двигателя также снижена с 148 до 65 и 70 кВт соответственно. Принятое решение позволило значительно уменьшить расход топлива в испытательных циклах. Подробно вопрос о влиянии рабочего объема ДВС на топливную экономичность автомобиля был рассмотрен нами ранее и опубликован в статье [4].

Сравнительная оценка топливной экономичности гибридных автомобилей относительно аналогов приведена в табл. 1. Для сопоставления 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, рассчитаны по данным каталогов [2] и 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 автомо-

биля Chevrolet Volt с электромотором 55 кВт. Этот автомобиль оснащён также на порядок более мощной, чем у обычных гибридов, литий-ионной батареей энергоёмкостью 16 кВт·ч с возможностью подзарядки её от электросети, что позволяет ему проехать на одной зарядке расстояние в 61 км. Силовая установка подобных автомобилей вследствие специфики их работы заслуживает отдельного рассмотрения. Следует отметить, что в последние годы, характеризующиеся бурным развитием автомобилей с электроприводом, появились необычные гибриды (PHEV) – Chevrolet Volt, Toyota Prius Plug-in и др. Они 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 применяются обычная электросеть или специальные зарядные устройства. Напрашивается вопрос, к какому типу можно отнести эти автомобили? В технической литературе автомобили с подзарядкой аккумуляторных батарей типа Chevrolet Volt относят к электромобилям, что является спорным, так как их силовая установка включает также двигатель внутреннего сгорания.

Третий коэффициент  $k_3 = N_{ДВС}/N_{\Sigma}$  характеризует отношение мощности ДВС к суммарной мощности силовой установки и находится в пределах 0,72–0,95. Подзаряжаемый гибридный автомобиль Chevrolet Volt имеет наименьшее значение коэффициента  $k_3$ ,

равное 0,57. Коэффициент  $N_1 = N_2/m_2$  характеризует отношение суммарной мощности силовой установки к полной массе автомобиля и находится в пределах 0,044–0,096. Наибольшее значение  $N_1$  свойственно скоростным гибридным автомобилям, таким как Porsche Cayenne. Автомобиль имеет максимальную скорость 242 км/ч и высокие динамические качества, разгон с места до 100 км/ч составляет 6,5 с.

Таким образом, можно сказать, что основополагающую роль в снижении расхода топлива автомобилем играет не сама по себе выбранная мощность электродвигателя силовой установки, а другие её характеристики, такие как, например, алгоритм работы энергоустановки, определяющий режим включения электродвигателя на различных режимах движения автомобиля, а также конструктивные особенности силовой установки, позволяющие ДВС работать в оптимальной зоне многопараметрической характеристики ДВС. Но при этом необходимо отметить, что для реализации оптимального с точки зрения экономичности алгоритма требуется определённая мощность электродвигателя, которая обеспечивает работу на электротяге в широком диапазоне нагрузок городского и магистрального циклов. Нужно также учитывать, что для успешного функционирования разрядно-зарядной системы силовой установки при движении автомобиля по циклу необходимо непрерывно поддерживать заряд батарей на определённом уровне. Это можно сделать только обеспечением положительного разрядно-зарядного баланса, который определяется алгоритмом работы силовой установки, разрядной мощностью генератора и тяговой мощностью электродвигателя. Одни схемы работы гибрида используют электродвигатель только на низких и средних нагрузках городского и магистрального циклов, другие – начинают движение при помощи двигателя внутреннего сгорания, а электромотор подключается в том случае, если требуется дополнительная мощность. Исходя из приведённых статистических данных, можно на первом этапе проектирования гибридного автомобиля выбрать соотношение мощностей его силовых агрегатов. На втором необходимо оценить выбранные мощностные параметры агрегатов при движении автомобиля в испытательном городском цикле (ГЦ) методом математического моделирования. Для этого надо знать значение нагрузок на силовую установку автомобиля.

Цикл Правил № 83 ЕЭК ООН, приведённый на рис. 2, включает:

- разгон с ускорением в течение заданного времени и до заданной скорости;
- равномерное движение с заданной скоростью в течение заданного времени;
- замедление до заданной скорости или до полной остановки;

– стоянку с работающим на холостых оборотах двигателем.

Значение мощности при движении по циклу можно определить расчётным путём. Средняя мощность, затрачиваемая на преодоление сил инерции на участке Dt цикла Правил № 83 ЕЭК ООН [5]:

$$\bar{N}_j = \frac{G_a \cdot j_a \cdot \delta_j \cdot \bar{V}_a}{g \cdot 3.6}$$

где  $G_a$  — вес автомобиля;  $V_a$  — среднее значение скорости автомобиля в выбранном интервале времени цикла, км/ч;  $j_a$  — момент инерции автомобиля,  $\delta_j$  — ускорение автомобиля.

Средняя мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления качению на участке Dt:

$$\bar{N}_f = G_a \cdot f_0 \cdot \left(1 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{V}_a^2\right) \cdot \frac{\bar{V}_a}{3.6},$$

где  $f_0$  — коэффициент сопротивления качению.

Средняя мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления воздуха на участке  $D_i$ :

$$\bar{N}_w = \frac{c_x}{2} \cdot \rho \cdot F \cdot \frac{\bar{V}_a^3}{3.6^3},$$

где  $c_x$  — коэффициент аэродинамического сопротивления;  $\rho$  — плотность воздуха;  $F$  — площадь поперечного сечения автомобиля.

Средняя мощность, затрачиваемая на преодоление суммарного сопротивления на участке  $D_i$ :

$$\bar{N}_{K\Sigma} = \bar{N}_f + \bar{N}_w + \bar{N}_j.$$

Расчёты, проведённые авторами данной статьи, показывают, что на автомобиле УАЗ-3153 выбор мощности тягового электромотора во многом зависит от алгоритма работы силовой установки. В расчёте принимается, что мощность рекуперации при торможении в цикле полностью поглощается на аккумуляторной батарее. В конечном итоге задача расчёта сводится к определению составляющих баланса энергий в гибридной силовой установке. Расчёты проводились с различными вариантами включения ДВС и тягового электродвигателя. Если требуется обеспечить движение автомобиля в постоянных режимах и с ускорениями до скорости 30 км/ч европейского городского цикла, то максимальная мощность электродвигателя для автомобиля УАЗ-3153 может не превышать 30 кВт. Если использовать в цикле только режим электротяги, то на автомобиле необходим тяговый электродвигатель не менее 60 кВт. Автомобиль в городском цикле при этом рабо-

Таблица 2. Характеристики энергоустановок и показатели гибридных автомобилей

Гибридный автомобиль	Honda Insight	Honda Civic	Peugeot 508 HDi	Ford Escape	Chevrolet Volt 2012г	Toyota Prius Plug-in, 2012 г.	Toyota Prius, 2012 г.	Toyota Prius, 2009 г.	Porsche Cayenne	Lexus RX
Масса, т — $m_{\Sigma}$ (снаряж. — полная), кг	1 200–1 650	1 249–1 720	1 770–2 325	1 665–1 735	1 715–2 080	1 370–1 805	1 080–1 355	1 370–1 805	2 240–2 910	2 045–2 560
Мощность ДВС, N, кВт	72	70	120	132	63	73	54	73	245	183
Литраж ДВС, л	1,34	1,34	2,0	2,5	1,4	1,8	1,5	1,8	3,0	3,5
Мощность электродвигателя, Nэл, кВт	10	15	27	70	55	60	45	60	34	123
Мощность, $\Sigma$ (Nд + Nэ), кВт	72	84	147	132	110	100	74	100	279	219
Коэффициент K1, $K1 = N_{эл}/N_{ДВС}$	0,15	0,23	0,23	0,61	0,87	0,82	0,83	0,82	0,14	0,67
Коэффициент K2, $K2 = M_{кэл}/M_{кДВС}$	0,65	0,84	0,67	–	2,8 350/126	1,46 207/142	– 111/–	1,46	0,68	1,05
Коэффициент K3, $K3 = N_{ДВС}/N_{\Sigma}$	0,9	0,83	0,82	0,87	0,57	0,73	0,72	0,73	0,87	0,83
Коэффициент N1, $N1 = N_{\Sigma}/m_{\Sigma}$	0,044	0,049	0,063	0,076	0,053	0,055	0,054	0,055	0,096	0,085
Время разгона до 100 км/ч	12,4	–	8,8	10	9	10,4	–	10,4	6,5	7,8
Ёмкость батареи, кВт·ч	0,58 (Ni-MH) 100,1 В · 5,75 А·ч	(Li-Ion) 144 В, 20 кВт	1,2 (Ni-MH), U = 200 В, 31 кВт	(Ni-MH), U = 330 В	16 (Li-Ion), 60 А·ч	4,4 (Ni-MH), 6,5 А·ч, 202 В 4,4 (Li-Ion), 27 кВт	(Ni-MH), 144 В, 27 кВт	6,5 (Ni-MH), 202 В, 27 кВт	1,73 (Ni-H), 288 В	1,9 (Ni-MH), U = 288 В, 45 кВт, 6,5 А·ч
Скорость макс., V, км/ч	182	185	213	170	161	180	–	180	242	200
Расход топлива, л/100 км	EU 4,2/4,6/4,4	EU 4,3/5,2/4,6	EU 3,2/3,5/3,4	EPA 8,7/7,8/8,1	EC (715/2007) 0,9/1,3/1,2	EU 3,9/3,7/3,9 EU 2,1 л/100	– EU 2,5 л/100	EU 4,0/3,8/4,0	EU 8,7/7,9/8,2	EU 6,6/6,0/6,3
CO2	101	109	88	–	27	49	–	92	193	148
Пробег на заряжен. батарее	–	–	–	–	54–61	24–27	–	–	–	–

тает как электромобиль, то есть без подзарядки. Но в данном случае ему потребуется аккумуляторная батарея большой мощности и, соответственно, веса и стоимости [6].

На рис. 2 представлена графическая иллюстрация движения автомобиля УАЗ-3153 с гибридной силовой установкой по европейскому городскому испытательному циклу Правил № 83 ЕЭК ООН. Разгон автомобиля с ГСУ в городском цикле во второй фазе с 15 до 30 км/ч и в третьей фазе с 15 до 50 км/ч осуществляется за счёт двигателя внутреннего сгорания, при этом ДВС работает в зоне минимальных удельных расходов. Избыток мощности ДВС при разгоне во второй фазе направляется в накопитель энергии. Для экономии топлива и снижения токсичности движение автомобиля в первой фазе (разгон до 15 км/ч и движение на постоянной скорости) должно осуществляться в электрорежиме. Электро-

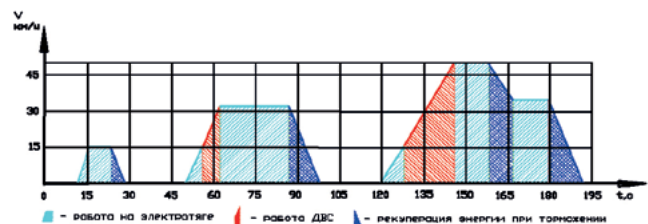


Рисунок 2. Графическая иллюстрация движения автомобиля УАЗ-3153 с гибридной силовой установкой по европейскому городскому испытательному циклу Правил № 83-05 ЕЭК ООН

двигатель должен обеспечивать при разгоне требуемое испытательным циклом ускорение, равное  $0,94 \text{ м/с}^2$ . При скоростях, превышающих 30 км/ч, разгон в электрорежиме с электродвигателем 30 кВт невозможен, так как суммарная мощность сопротивления движению превышает тяговую мощность на колёсах автомобиля.

Таблица 3. Результаты расчётного моделирования работы гибридной силовой установки автомобиля УАЗ-3153 в городском цикле

№	Городской цикл	Нагрузка Средняя /Пиковая мощн., кВт	Вариант № 1		Вариант № 2		Вариант № 3		Вариант № 4	
	Операция		Эл. дв. 15 кВт	Эл. дв. 30 кВт	Эл. дв. 15 кВт	Эл. дв. 15 кВт	Эл. дв. 30 кВт	Эл. дв. 30 кВт	Эл. дв. 15 кВт	Эл. дв. 30 кВт
1	Холостой ход	0								
2	Ускорение	7,5/15	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	ДВС	ДВС
3	Постоянная скорость	3/6	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.
4	Замедление	2,5/5	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
5	Замедление	0	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
6	Холостой ход	0	ДВС	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	ДВС	–
7	Ускорение	2,5/5	ДВС	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	ДВС	Эл. дв.
8	Переключение передачи	–	ДВС	–	ДВС	ДВС	–	–	ДВС	–
9	Ускорение	15/30	Эл. дв.	Эл. дв.	ДВС	ДВС	Эл. дв.	Эл. дв.	ДВС	Эл. дв.
10	Постоянная скорость	5/5	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.
11	Замедление	6,5/13	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
12	Замедление	–	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
13	Холостой ход	0	ДВС	ДВС	ДВС	Эл. дв.			ДВС	ДВС
14	Ускорение	7,5/15	ДВС	ДВС	ДВС	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	ДВС	ДВС
15	Переключение передачи	–	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	–	ДВС	ДВС	ДВС
16	Ускорение	15/30	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	Эл. дв.	ДВС	ДВС	ДВС
17	Переключение передачи	–	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС
18	Ускорение	27,5/55	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС
19	Постоянная скорость	10/10	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС
20	Замедление	7,5/15	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
21	Постоянная скорость	7/7	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	ДВС	ДВС
22	Переключение передачи	–	–	–	–	–	–	–	ДВС	ДВС
23	Замедление	7,5/15	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
24	Замедление		Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
25	Холостой ход	0								
	Сумма за цикл	Зар. от ДВС, кДж	521	436	496	441	288	396	826	741
	Сумма за цикл	Зар. от ДВС + рек.	740	655	715	660	507	615	1 045	960
	Сумма за цикл	Эл. дв., кДж	265	352,5	190	315	525	390	144	231,5
	Сумма за цикл	Рекуп., кДж	219	219	219	219	219	219	219	219
	Сумма за цикл	Энерг. ДВС, кДж	600	512,5	587,5	550	340	475	721	633,5
	Сумма за цикл	Δ энерг. (баланс зр), кДж	475	302,5	525	345	-18	225	901	728,5
		Достигнутая экономия энергии за цикл	27 %	37,5 %	28 %	33 %	–	42 %	12 %	23 %

\* Экспериментальные исследования гибридного автомобиля УАЗ-3153 на стенде с беговыми барабанами по европейскому городскому испытательному циклу Правил № 83 ЭЕК ООН подтвердили эти данные расчёта [5].

В третьей фазе разгона автомобиля в ГЦ требуется включение в работу основного ДВС, который одну часть своей мощности будет расходовать на движение, а вторую — направлять через генератор на зарядку аккумуляторной батареи. При этом ДВС работает в зоне минимальных эффективных расходов топлива.

В табл. 3 приведены результаты расчётного моделирования работы гибридной силовой установки автомобиля УАЗ-3153 в городском европейском испытательном цикле. Расчёты баланса мощностей

проводились с помощью программы Excel. Задача сводится к определению количества энергии, затраченной силовой установкой на движение автомобиля по отдельным этапам цикла и на накопление энергии на аккумуляторной батарее от ДВС, а также энергии рекуперации при торможении. На рис. 3 приведена иллюстрация результатов расчёта энергетического баланса гибридного автомобиля УАЗ-3153. Суммирование мощностей по этапам позволит определить общую затраченную и рекуперированную энергию.



Разрядно-зарядный баланс силовой установки гибридного автомобиля

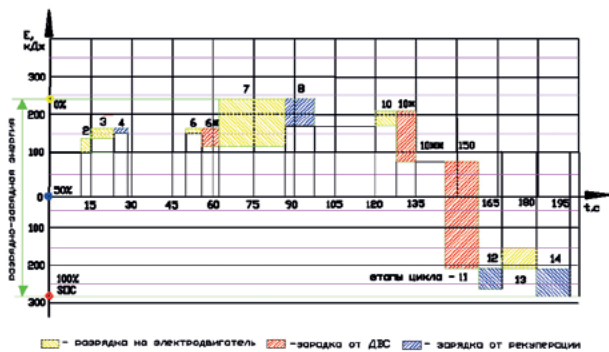


Рисунок 3. Результаты расчёта энергетического баланса силовой установки автомобиля УАЗ-3153

Долевая часть использования мощности тягового электродвигателя на нагрузочных режимах цикла определяется мощностью применяемого в силовой установке электродвигателя, степенью зарядки батареи и её максимальной мощностью. Определение расчётным путём электрических составляющих баланса энергии в цикле позволяет оценить ёмкость аккумуляторной батареи.

В табл. 3 из-за ограничения по объёму статьи не показаны все рассмотренные варианты работы силовой установки. Также не приводится подробно использованная методика расчёта. Применение электродвигателя 15 кВт на автомобиле УАЗ-3153 максимально позволяет получить 33%-ю экономию топлива в европейском городском цикле. При этом выбранный алгоритм работы силовой установки является оптимальным с точки зрения разрядно-зарядного баланса. Применение электродвигателя 30 кВт позволяет скорректировать алгоритм и улучшить топливную экономичность до 42 % относительно стандартного варианта автомобиля\*.

Результаты расчётных исследований, приведённых в табл. 3, показывают, что наиболее рациональным с точки зрения разрядно-зарядного баланса и работы аккумуляторной батареи в городском цикле является вариант № 3 работы силовой установки с электродвигателем 30 кВт. Положительный разрядно-зарядный баланс аккумуляторной батареи при таком алгоритме работы силовой установки составляет наиболее низкое значение — 225 кДж, что позволяет применять на автомобиле батарею меньшей мощности и, соответственно, веса. Отрицательные значения разрядно-зарядного баланса аккумуляторной батареи при других вариантах показывают полную разрядку батареи и невозможность выполнения движения автомобиля с выбранным типом силовой установки по городскому циклу с использованием электротяги.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ статистических данных различных моделей гибридных автомобилей позволил определить коэффициенты, по которым можно выбрать мощностные параметры силовой установки на первом этапе их проектирования. Проведённые расчётные исследования также показали, что основополагающую роль в достижении низких расходов топлива гибридного автомобиля играет не сама по себе выбранная мощность электродвигателя силовой установки, а алгоритм работы энергоустановки, определяющий режим включения электродвигателя в различных режимах движения автомобиля. Но для реализации оптимального с точки зрения экономичности алгоритма необходима определённая мощность электродвигателя, которая обеспечивает работу на электротяге в широком диапазоне нагрузок городского и магистрального циклов.

Расчётные исследования также продемонстрировали, что применение электродвигателя 15 кВт на автомобиле УАЗ-3153 максимально позволяет получить 33%-ю экономию топлива в европейском городском цикле. Использование электродвигателя 30 кВт позволяет скорректировать алгоритм и улучшить топливную экономичность до 42 % относительно стандартного варианта автомобиля.

Определение расчётным путём электрических составляющих разрядно-зарядного баланса аккумуляторной батареи при выбранном алгоритме работы силовой установки в городском цикле позволяет оценить ёмкость аккумуляторной батареи автомобиля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Electric & Hybrid Vehicle Technology International. — 2010–2013.
2. Automobil Revue: каталоги автомобилей. — 2007–2013.
3. Шабанов А.В., Шабанов А.А. Гибридные автомобили и новый этап экологической безопасности при совершенствовании конструкции автомобильных силовых установок: науч.-тех. сб. МГУ-ПИ. — М.: Информатика и технология, 2012. — № 18. — С. 63–70.
4. Ломакин В.В., Шабанов А.В., Шабанов А.А. К вопросу выбора мощности ДВС энергетической установки гибридных автомобилей // Журнал автомобильных инженеров. — 2013. — № 1 (78). — С. 26–29.
5. Автомобили с гибридной силовой установкой: учеб. пособие для вузов / С.В. Бахмутов, В.В. Селифонов, В.В. Ломакин и др. — М.: МГТУ «МАМИ», 2009. — 136 с.
6. Ломакин В.В., Шабанов А.В., Шабанов А.А. К расчёту баланса мощности комбинированной энергоустановки гибридного автомобиля // Журнал автомобильных инженеров. — 2013. — № ? (?).