

УДК 629.113

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ КАТЕГОРИИ M_1 В ЕВРОПЕЙСКОМ ГОРОДСКОМ ЦИКЛЕ

В. В. Ломакин, к. т. н. / П. А. Красавин, к. т. н. / А. А. Шабанов, инж. / А. В. Шабанов, к. т. н.
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ»

При математическом моделировании движения гибридного автомобиля категории M_1 в европейском городском цикле можно рассматривать различные варианты работы силовой установки, оценивать и корректировать её алгоритм управления, выбирать мощностные параметры ДВС и электродвигателя с целью оптимизации работы СУ.

Европейский городской цикл Правил № 83–06 ООН содержит набор операций и этапов движения автомобиля. Каждая операция городского цикла характеризуется нагрузочными и скоростными режимами, то есть мощностью, необходимой для движения автомобиля.

Нагрузка определяется контрольной массой транспортного средства. Тормоз, поглощающий и имитирующий дорожную нагрузку, регулируют таким образом, чтобы поглощалось усилие, передаваемое на ведущие колёса автомобиля при постоянной скорости 80 км/ч в соответствии с рекомендацией Правил № 83 ООН.

Усилие, поглощённое тормозом в диапазоне скоростей от 0 до 120 км/ч, рассчитывают по следующей формуле:

$$F = (a + b \cdot V^2) \pm 0,1 \cdot F_{80},$$

где F — общее усилие, поглощённое динамометрическим стендом, Н; a — значение, эквивалентное сопротивлению качению, Н; b — значение, эквивалентное коэффициенту аэродинамического сопротивления, Н/(км/ч)²; V — скорость, км/ч; F_{80} — усилие при 80 км/ч, Н.

Коэффициенты a и b выбирают исходя из контрольной массы транспортного средства. По формуле можно рассчитать усилие нагружения и мощность в различных режимах цикла.

Коэффициенты дорожной нагрузки определяются исходя из суммарного сопротивления движения автомобиля. Средняя мощность, затрачиваемая на преодоление суммарного сопротивления на отдельном участке движения в городском цикле:

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

Средняя мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления качению:

$$\bar{N}_f = G_a \cdot f_0 \cdot \left(1 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{V}_a^2\right) \cdot \frac{\bar{V}_a}{3,6},$$

где f_0 — коэффициент сопротивления качению.

Данный коэффициент зависит от целого ряда факторов, качественное влияние которых описано в теории ДВС.

Средняя мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления воздуха:

$$\bar{N}_w = \frac{c_x}{2} \cdot \rho \cdot F \cdot \frac{\bar{V}_a^3}{3,6^3},$$

где c_x — коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ — плотность воздуха; F — площадь поперечного сечения автомобиля.

Средняя мощность, затрачиваемая на преодоление сил инерции:

$$\bar{N}_j = \frac{G_a}{g} \cdot j_a \cdot \delta_j \cdot \frac{\bar{V}_a}{3,6},$$

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

Зная рабочие параметры нагружения ДВС автомобиля в городском цикле и характеристики ДВС, можно расчётным путём определить мощностной баланс энергетической установки. При моделировании движения автомобиля УАЗ-3153 в городском цикле использовались параметры двигателя ЗМЗ-4062.10 (рабочим объёмом 2,3 л).

В табл. 1 приведены режимы движения автомобиля в городском цикле. Городской цикл состоит из фаз разгона автомобиля до определённой скорости, равномерного движения, замедления и режимов холостого хода. Выбранные режимы управления силовой установкой можно представить в табличном виде или более наглядно — графически. Расчёты проводились с помощью программы Microsoft Excel с различными вариантами включения ДВС и тягового электродвигателя.

Критерием оптимальности работы силовой установки является минимальный расход энергии движения и, соответственно, расход топлива. Необходимый уровень зарядки батареи также является критерием оптимизации.

В конце испытательного цикла величина зарядки батареи должна быть равна первоначальному значению. Это поддерживает определённый баланс батареи и позволяет использовать батарею меньшей ёмкости.

Таблица 1. Городской рабочий цикл на динамометрическом стенде

Номер операции	Операция	Этап	Ускорение движения, м/с ²	Скорость движения, км/ч	Продолжительность		Пиковая нагрузка на этапах цикла для автомобиля категории М ₁ (инерционная масса — 2 150 кг) кВт
					Операции, сек.	Суммарная, сек.	
1	Холостой ход	1	0	0	11	11	0
2	Ускорение	2	1,04	0–5	4	15	15
3	Постоянная скорость	3	0	15	9	23	3
4	Замедление	4	-0,69	15–0	2	25	-5
5	Замедление с выключенным сцеплением		-0,92	10–0	3	28	
6	Холостой ход	5	0	0	21	49	0
7	Ускорение	6	0,83	0–5	5	54	5
8	Переключение передачи			15	2	56	—
9	Ускорение		0,94	15–2	5	61	30
10	Постоянная скорость	7	0	32	24	85	5
11	Замедление	8	-0,75	32–0	8	93	-13
12	Замедление с выключенным сцеплением		-0,92	10–0	3	96	—
13	Холостой ход	9	0	0	21	117	0
14	Ускорение	10	0,83	0–5	5	122	15
15	Переключение передачи			15	2	124	—
16	Ускорение		0,62	15–35	9	133	30
17	Переключение передачи			35	2	135	—
18	Ускорение		0,52	35–0	8	143	55
19	Постоянная скорость	11	0	50	12	155	10
20	Замедление	12	-0,52	50–5	8	163	-15
21	Постоянная скорость	13	0	35	13	176	7
22	Переключение передачи	14		35	2	178	—
23	Замедление		-0,99	35–0	7	185	-15
24	Замедление с выключенным сцеплением		-0,92	10–0	3	188	—
25	Холостой ход	15	0	0	7	195	0

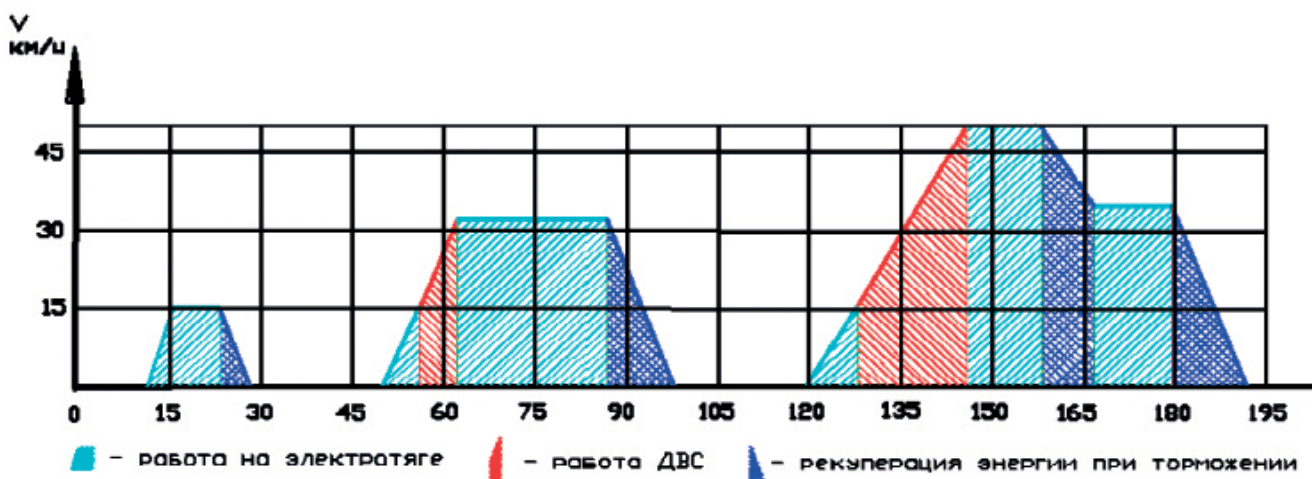


Рисунок 1. Графическая иллюстрация моделирования движения автомобиля UA3-3153 с гибридной силовой установкой в европейском городском испытательном цикле Правил № 83-05 ООН

Таблица 2. Результаты расчётного моделирования работы гибридной силовой установки автомобиля УАЗ-3153 в городском цикле

№	Городской цикл Операция	Нагрузка Средняя/пиковая N_e , кВт	Вариант № 1		Вариант № 2 (5.1)		Вариант № 5	
			Эл. дв. 15 кВт	Эл. дв. 30 кВт	Эл. дв. 15 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.
3	Постоянная скорость	3/3	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.
4	Замедление	2,5/5	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
5	Замедление	0	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
6	Холостой ход	0	ДВС	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.
7	Ускорение	2,5/5	ДВС	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.
8	Переключение передачи	—	ДВС					
9	Ускорение	15/30	ДВС	Эл. дв.	ДВС	Эл. дв.	ДВС	Эл. дв.
10	Постоянная скорость	5/5	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.
11	Замедление	6,5/13	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
12	Замедление	—	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
13	Холостой ход	0	ДВС	ДВС	ДВС		Эл. дв.	
14	Ускорение	7,5/15	ДВС	ДВС	ДВС	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.
15	Переключение передачи	—	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС		
16	Ускорение	15/30	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	Эл. дв.
17	Переключение передачи		ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС
18	Ускорение	27,5/55	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС
19	Постоянная скорость	10/10	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС
20	Замедление	7,5/15	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
21	Постоянная скорость	7/7	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.
22	Переключение передачи	—	—	—	—	—	—	—
23	Замедление	7,5/15	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
24	Замедление		Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
25	Холостой ход	0						
	Сумма за цикл	Зар. от ДВС, кДж	521	436	496	396	441	288
	Сумма за цикл	Зар. от ДВС + рекуп.	740	655	715	615	660	507
	Сумма за цикл	Эл. дв., кДж	265	352,5	190	390	315	525
	Сумма за цикл	Рекуп., кДж	219	219	219	219	219	219
	Сумма за цикл	Энерг. ДВС, кДж	600	512,5	587,5	475	550	340
	Сумма за цикл	Δэнерг. (баланс зр), кДж	475	302,5	525	225	345	-18
	Достигнутая экономия энергии за цикл	$(E_{ДВС\Sigma} - E_{ДВСВ}) * 100 / E_{ДВС\Sigma}$	27 %	37,5 %	28 %	42 %	33 %	—

Если требуется обеспечить движение автомобиля в постоянных режимах и с ускорениями до скорости 30 км/ч на электротяге, 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 работает как электромобиль, то есть без подзарядки от ДВС. Но в данном случае ему потребуются аккумуляторная батарея большой мощности, а также, соответственно, веса и стоимости.

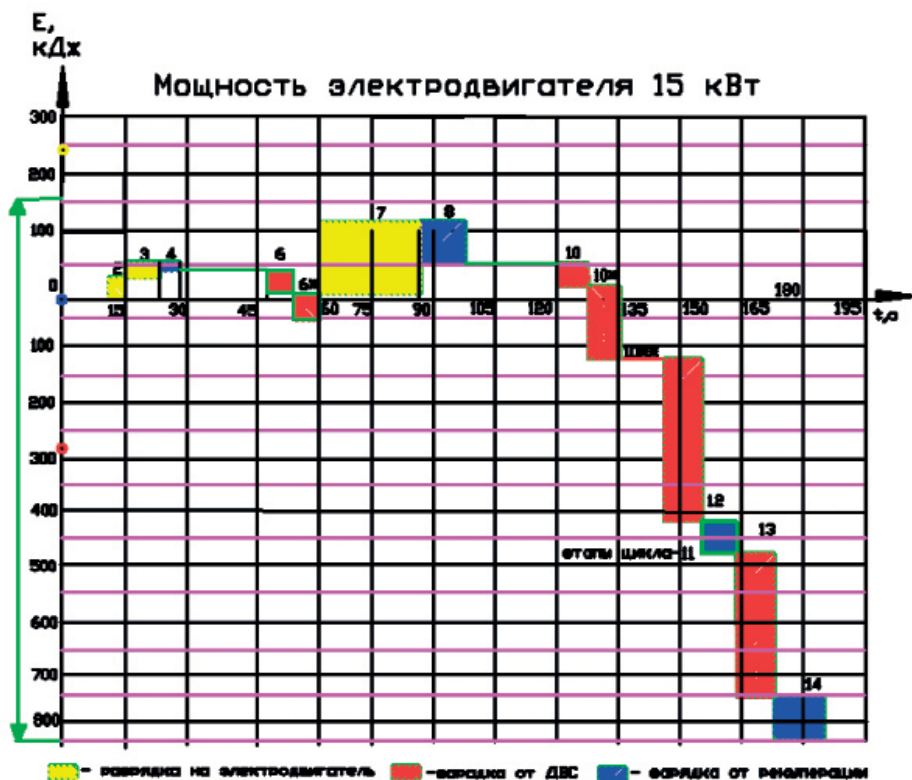
На рис. 1 представлена графическая иллюстрация одного из вариантов движения автомобиля УАЗ-3153 в европейском городском испытательном цикле Правил № 83 ООН. Разгон автомобиля с ГСУ в городском цикле во второй фазе с 15 до 30 км/ч и в третьей фазе

с 30 до 50 км/ч осуществляется за счёт двигателя внутреннего сгорания, при этом ДВС работает в зоне минимальных удельных расходов. Избыток мощности ДВС при разгоне направляется в накопитель энергии.

При расчёте энергетического баланса задача сводится к определению количества энергии, затраченной силовой установкой на движение автомобиля по отдельным этапам цикла и накопление энергии на аккумуляторной батарее от ДВС, а также энергии рекуперации при торможении. Для определения в городском цикле общего количества энергии, затраченной при разгоне, фазу разгона разбивают на элементарные отрезки D_i . В пределах интервала скорость автомобиля и мощность считаются постоянными (средними).

Это позволяет рассчитать энергию движения, как и в случае равномерного движения. Суммирование

Рисунок 2. Зарядно-разрядный баланс силовой установки с электродвигателем мощностью 15 кВт



Разрядно-зарядный баланс силовой установки гибридного автомобиля

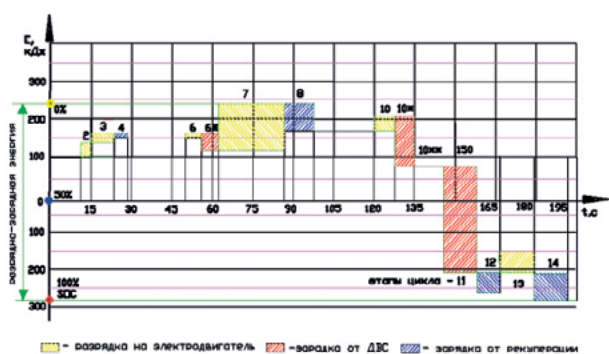


Рисунок 3. Результаты расчёта зарядно-разрядного баланса силовой установки с электродвигателем мощностью 30 кВт автомобиля УАЗ-3153 (эл. N = 30 кВт)

мощностей по этапам позволит определить общую затраченную и рекуперированную энергию.

Для выполнения выбранной оптимальной стратегии работы СУ и поддержания баланса энергии в аккумуляторной батарее необходим правильный подбор мощности агрегатов силовой установки автомобиля. Если требуются работа СУ на электротяге в первой фазе движения и движение с постоянными скоростями, то максимальная мощность тягового электродвигателя может не превышать 15 кВт. Но эффективность работы СУ с таким электродвигателем, как это будет показано расчётом баланса энергии, мала.

Алгоритм работы СУ с ТЭД мощностью 15 кВт и его зарядно-разрядный баланс представлены на рис. 2 в виде

диаграммы. На рис. 2 также приведены результаты расчёта энергетического баланса гибридного автомобиля УАЗ-3153 с электродвигателем мощностью 15 кВт. Разрядный баланс цикла составляет 150 кДж, а зарядный — 850 кДж, то есть в шесть раз больше.

В данном варианте достигается 15%-я экономия энергии (топлива) за счёт использования электротяги. Зарядно-разрядный баланс не является оптимальным, так как на батарее накапливается избыток энергии, которую тяговый электродвигатель не может реализовать при рассматриваемом алгоритме работы СУ. Следовательно, необходим более мощный электродвигатель и, соответственно, другой алгоритм работы СУ.

Рассмотрим алгоритм работы СУ с ТЭД мощностью 30 кВт, который изображён на рис. 3.

Его зарядно-разрядный баланс скорректирован относительно предыдущего таким образом, чтобы он обеспечивал минимальную разницу в зарядно-разрядной энергии СУ. ТЭД мощностью 30 кВт позволяет обеспечить минимальный зарядно-разрядный баланс. Заряд энергии батареи составляет 280 кДж, а её разряд на ТЭД — 240 кДж. Это позволяет применять на автомобиле батарею меньшей мощности и, соответственно, веса. Экономия энергии в данном варианте достигает 42 %. Зная энергию заряда и общее время работы СУ в испытательном цикле, можно рассчитать необходимую ёмкость аккумуляторной батареи.

Отрицательные значения зарядно-разрядного баланса аккумуляторной батареи при других вариантах

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

№	Городской цикл	Нагрузка Средняя/пиковая N_p , кВт	Вариант № 3		Вариант № 4		Вариант № 6
	Операция		Эл. дв. 15 кВт	Эл. дв. 30 кВт	Эл. дв. 15 кВт	Эл. дв. 30 кВт	Эл. дв. 30 кВт
1	Холостой ход	0			ДВС	ДВС	
2	Ускорение	7,5/15	Эл. дв.	Эл. дв.	ДВС	ДВС	Эл. дв.
3	Постоянная скорость	3/3	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.
4	Замедление	2,5/5	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
5	Замедление	0	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
6	Холостой ход	0	ДВС		ДВС		Эл. дв.
7	Ускорение	2,5/5	ДВС	Эл. дв.	ДВС	Эл. дв.	Эл. дв.
8	Переключение передачи	—	ДВС		ДВС		
9	Ускорение	15/30	ДВС	Эл. дв.	ДВС	Эл. дв.	Эл. дв.
10	Постоянная скорость	5/5	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.	Эл. дв.
11	Замедление	6,5/13	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
12	Замедление	—	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
13	Холостой ход	0	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС
14	Ускорение	7,5/15	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС
15	Переключение передачи	—	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	
16	Ускорение	15/30	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	Эл. дв.
17	Переключение передачи		ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	
18	Ускорение	27,5/55	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС
19	Постоянная скорость	10/10	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	Эл. дв.
20	Замедление	7,5/15	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
21	Постоянная скорость	7/7	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	Эл. дв.
22	Переключение передачи	—	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	—
23	Замедление	7,5/15	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
24	Замедление		Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
25	Холостой ход	0					
	Сумма за цикл	Зар. от ДВС, кДж	794	709	826	741	40
	Сумма за цикл	Зар. от ДВС + рекуп.	1 013	928	1 045	960	259
	Сумма за цикл	Эл. дв., кДж	174	261,5	144	231,5	707,5
	Сумма за цикл	Рекуп., кДж	219	219	219	219	219
	Сумма за цикл	Энерг. ДВС, кДж	691	604	721	633,5	257,5
	Сумма за цикл	Δэнерг. (баланс зр), кДж	839	666,5	901	728,5	-448,5
	Достигнутая экономия энергии за цикл	$(E_{ДВС\Sigma} - E_{ДВСВ}) * 100 / E_{ДВС\Sigma}$	16 %	26 %	12 %	23 %	—

показывают полную разрядку батареи и невозможность выполнения движения автомобиля с выбранным алгоритмом силовой установки в городском цикле.

Экспериментальные исследования гибридного автомобиля УАЗ-3153 на стенде с беговыми барабанами в европейском городском испытательном цикле подтвердили эти данные расчёта.

ВЫВОДЫ

Таким образом, предложенная методика расчётного моделирования движения гибридного автомобиля и зарядно-разрядного баланса батареи позволяет оценивать и корректировать алгоритм управления силовой установкой, выбирать мощностные параметры ДВС и электродвигателя с целью оптимизации её работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ломакин В. В., Шабанов А. В., Шабанов А. А. К выбору мощности и алгоритма работы силовой установки гибридного автомобиля // Журнал автомобильных инженеров. — 2013. — № 6 (83). — С. 40–45.
2. Ломакин В. В., Шабанов А. В., Шабанов А. А. К расчёту баланса мощности комбинированной энергоустановки // Журнал автомобильных инженеров. — 2014. — № 1 (84). — С. 24–27.
3. Шабанов А. В., Ломакин В. В., Шабанов А. А. Выбор алгоритма работы и параметров силовой установки гибридного автомобиля, последовательность расчёта энергетического баланса ГСУ // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2013. — Вып. 7. — № 21 (124).