

Мировое сообщество обеспокоено сохранением среды обитания. По данным некоторых источников, численные пределы допустимого воздействия на природу к настоящему времени превышены в десять раз, и это создаёт риск вероятности «пятьдесят на пятьдесят», что XXI век станет последним веком существования человечества (9-я Оксфордская конференция «Будущее человечества», 2004 г.). Значительную часть отрицательного воздействия в эту проблему вносят технические средства, основными из которых являются транспортные всех видов и назначений. Поэтому многие страны ведут интенсивные поиски решения проблемы по снижению техногенного воздействия на окружающую среду, в том числе снижения токсичности выбросов отработавших газов силовых энергетических установок (ДВС). Проводятся такие работы и в России, результаты одной из разработок предлагаются читателям журнала.

Испытания экспериментального образца гибридного транспортного средства

Исследования и разработки транспортных средств (далее автомобилей) с гибридными силовыми установками (ГСУ) проводятся всеми ведущими автопроизводителями и разработчиками. В МГТУ «МАМИ» работы по созданию ГСУ ведутся в рамках созданного при кафедре «Автомобили» Научно-образовательного центра «Автомобили с гибридными силовыми установками» (далее кафедра «Автомобили»). Применение таких силовых установок позволяет добиться существенного улучшения экономических и экологических качеств автомобилей без ухудшения тягово-динамических характеристик и существенного увеличения стоимости при массовом производстве.

Все существующие варианты ГСУ можно разделить на три принципиальные группы: с последовательной, параллельной и комбинированной (смешанной – типа «сплит») схемой исполнения связей ДВС и обратимой электромашин.

При создании экспериментального образца гибридного автомобиля с оригинальной ГСУ (параллельной схемы исполнения) в качестве базового шасси был выбран многоцелевой полноприводный автомобиль УАЗ-3153 Ульяновского автомобильного завода. Выбор данной схемы обусловлен расчётами топливной экономичности автомобилей с ГСУ различных схем, проведёнными на кафедре «Автомобили», согласно которым были получены следующие результаты:

- самый выгодный вариант с точки зрения топливной экономичности – ГСУ, выполненная по комбинированной схеме, которая делает автомобиль экономичнее серийного образца на 52,8%;

- вариант ГСУ с последовательной схемой обеспечивает экономию на 47%;
- то же при параллельной схеме исполнения – на 51,7%.

Тем не менее, была выбрана параллельная схема исполнения ГСУ, поскольку:

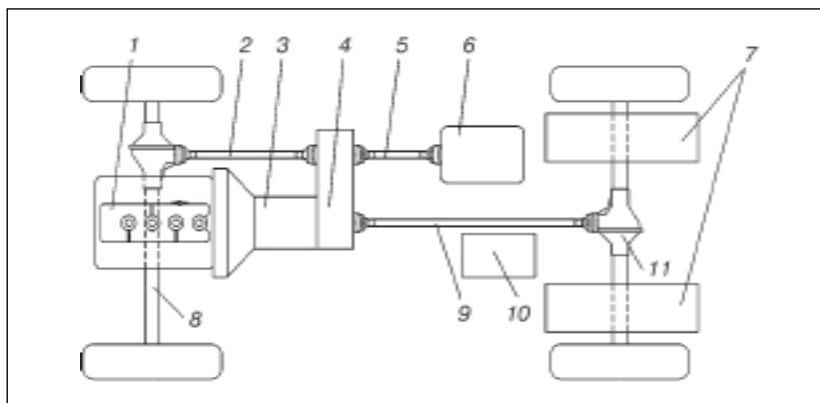
- отечественная промышленность выпускает все необходимые компоненты для её реализации – как автомобильные, так и электрические узлы и агрегаты;
- обеспечивается топливная экономичность, практически не отличающаяся от той, которую может дать комбинированная схема;
- она обладает простотой исполнения.

Компоновочная схема автомобиля УАЗ-3153, оборудованного ГСУ с параллельной схемой, приведена на рис. 1.

Автомобиль с ГСУ содержит ДВС 1 со сцеплением и коробкой передач (КП) 3, обратимую электрическую машину (ЭМ) 6, единое приёмно-распределительное устройство (ЕПРУ) 4, карданный вал 9 привода заднего моста 11, карданный вал 2 привода переднего моста 8, карданный вал 5 привода обратимой

В.В. СЕЛИФОНОВ,
канд. техн. наук,
А.И. ФИЛОНОВ,
Е.Е. БАУЛИНА,
К.Е. КАРПУХИН,
Е.В. АВРУЦКИЙ
(Московский
государственный
технический
университет «МАМИ»)

Рис. 1. Компоновочная схема автомобиля УАЗ-3153, оборудованного ГСУ с параллельной схемой



электрической машины 6, блок преобразования 10, блок аккумуляторных батарей (АБ) 7.

В конструкции этого образца применены компоненты и основные элементы не только серийного автомобиля (ДВС, КП, приводы переднего и заднего мостов), но и новые устройства (обратимая электрическая машина с индивидуальным приводом, система управления тяговым электрооборудованием и накопители энергии). В таком компоновочном решении экспериментального образца автомобиля с ГСУ была наиболее полно реализована возможность получения нескольких различных вариантов трансмиссионных схем привода колёсного движителя от разных ис-

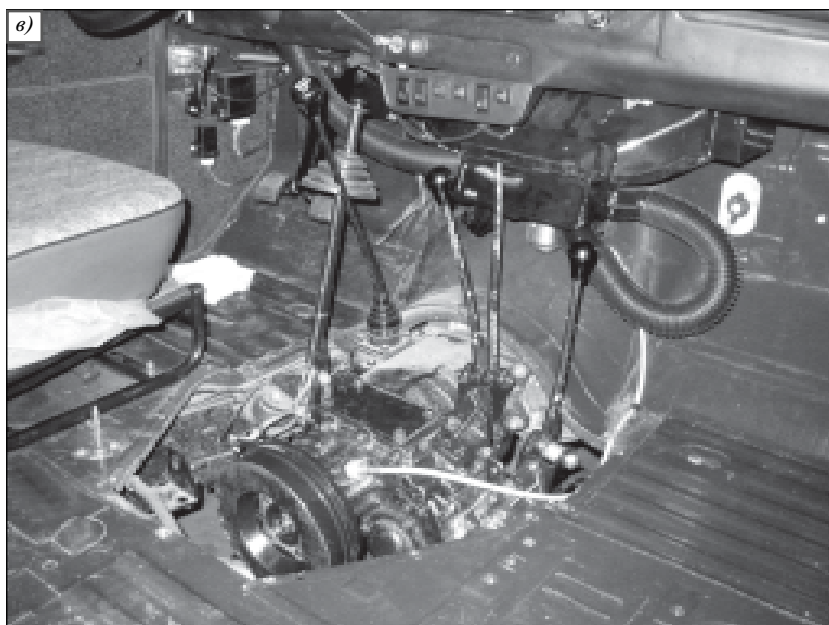
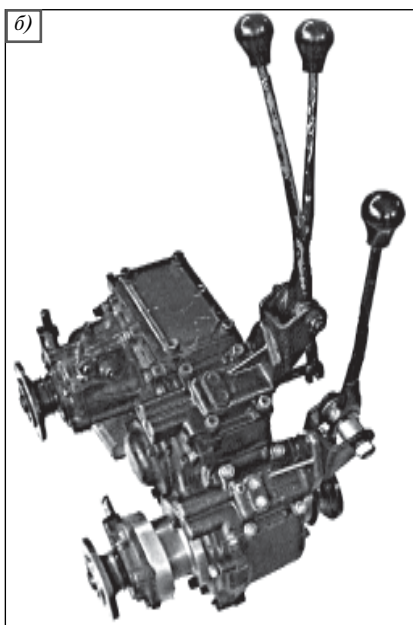
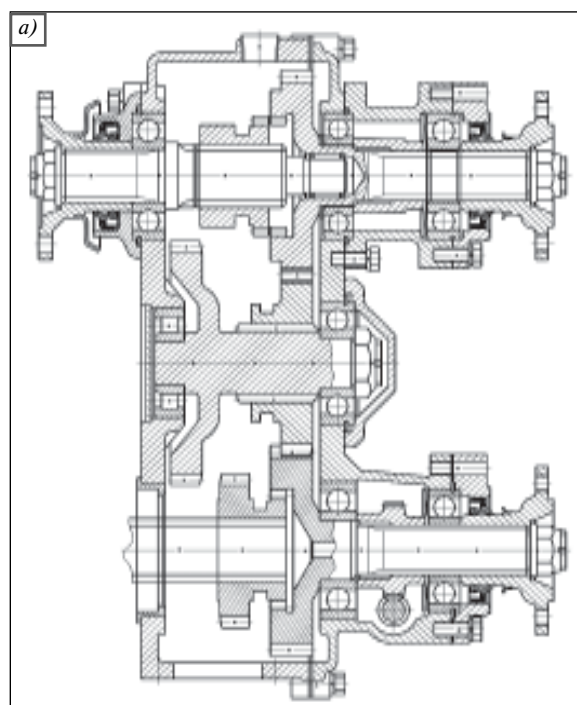
точников энергии. В результате обеспечивается сравнительная оценка каждой из них.

В связи с этим было разработано и изготовлено ЕПРУ на базе серийной раздаточной коробки: с одной стороны к нему подводится крутящий момент от ДВС, а с другой – от обратимой электрической машины, работающей как в режиме тягового электродвигателя, так и в режиме генератора для зарядки АБ (при торможении автомобиля для рекуперации накопленной кинетической энергии и при равномерном движении для обеспечения возможности работы ДВС по характеристике минимальных удельных расходов топлива). В результате появилась возможность реализации на одном экспериментальном образце следующих функциональных вариантов параллельной схемы ГСУ:

- разблокированный полный привод: передний мост приводится от тягового электродвигателя, а задний – от ДВС через стандартную трансмиссию;
- полный привод от двух двигателей одновременно: от ДВС со стандартной трансмиссией и тягового электродвигателя с подачей мощности на соответствующий вал раздаточной коробки;
- полный привод только от ДВС;
- то же от тягового электродвигателя;
- задний привод только от ДВС;
- то же от тягового электродвигателя;
- то же от обоих двигателей;
- передний привод только от тягового электродвигателя.

При этом режим разблокированного полного привода колёс может длительно использоваться на дорогах, т.е. является постоянным полным приводом, и при этом нет необ-

Рис. 2. Конструкция (а), общий вид (б) ЕПРУ и его установка на автомобиль (в)



ходимости введения в конструкцию трансмиссии межосевого дифференциала.

Применённая на экспериментальном образце автомобиля компоновочная схема ГСУ (см. рис. 1) с ЕПРУ обеспечивает возможность варьирования как типом используемой энергетической установки (ДВС, электродвигатель или их комбинация), так и типом привода (полный блокированный, полный от разных источников энергии, индивидуальный, т.е. от разных источников энергии на каждый из мостов). При этом использование промежуточных узлов и агрегатов при передаче мощности не требуется, что повышает КПД трансмиссии; возможность движения с полным приводом обеспечивается при выключенном ДВС, т.е. при минимальных тепловых и звуковых излучениях. Всё перечисленное в совокупности упрощает конструкцию, снижает массу автомобиля и затраты на его производство.

Конструкция, общий вид разработанного ЕПРУ и его установка на автомобиле приведены на рис. 2.

Система тягового электрооборудования выполнена на основе выпускаемых в настоящее время отечественной промышленностью компонентов, теоретических наработок и практического опыта НПП «КВАНТ». В ней использованы эффективные и экономичные способы и средства управления тяговым электродвигателем и преобразования электрической энергии в механическую. В её состав входят асинхронный электродвигатель (обратимая электрическая машина), блок преобразования энергии и управления, блок силовой коммутации, пульт управления, блок управления режимами электромашины, распределительная панель, блок аккумуляторных батарей.

Размещение пульта и блока управления режимами электромашины и распределительной панели приведено на рис. 3; установка на автомобиле блока преобразования энергии и управления, блоков силовой коммутации и АБ – на рис. 4; общий вид экспериментального образца автомобиля УАЗ-3153 с ГСУ – на рис. 5.

У автомобиля с ГСУ возможен вариант движения только посредством электропривода (ДВС не работает), при этом необходимо учитывать, что автомобиль УАЗ-3153 стандартной комплектации имеет гидроусилитель руля и вакуумный усилитель тормозов. Поэтому для реализации электрорежима на экспериментальном образце были предусмотрены: установка насоса гидроусилителя руля с приводом от электромотора, и соответствен-



Рис. 3. Размещение пульта и блока управления режимами электромашины и распределительной панели в кабине машиниста



Рис. 4. Установка на автомобиле блока преобразования энергии и управления, блоков силовой коммутации и АБ



Рис. 5. Общий вид экспериментального образца автомобиля УАЗ-3153 с ГСУ

Техническая характеристика автомобиля

Модель	УАЗ-3153 стандартной комплектации	УАЗ-3153 с ГСУ
Колёсная формула	4×4	4×4, 4×2
Масса, кг:		
полная	2600	2600
снаряжённая	1800	2140
тягового электрооборудования	–	340
ДВС:		
марка	УМЗ-4218.10	УМЗ-4218.10
мощность, кВт (л.с.)	73 (99,2)	73 (99,2)
крутящий момент, Н·м (кгс·м)	200 (20,4)	200 (20,4)
удельный расход топлива, г/(кВт·ч) [г/(л.с.·ч)]	300 [221]	300 [221]
Электродвигатель:		
тип	–	обратимая асинхронная электромашина с короткозамкнутым ротором
масса, кг	–	100
мощность, кВт	–	35
крутящий момент, Н·м	–	280
частота вращения, мин ⁻¹	–	2600
напряжение, В	–	120
ток, А	–	220
Электрические накопители:		
тип	–	кислотно-свинцовые аккумуляторные батареи «Оптима D 1000»
масса, кг	–	19
количество, шт.	–	10
максимальная ёмкость в трёхчасовом режиме разряда, А·ч	–	55
Гибридная силовая установка:		
тип	–	УМЗ-4218.10 в совокупности с обратимым асинхронным электродвигателем, коммутационной аппаратурой и комплектом АБ
мощность, кВт	–	108 (147)
крутящий момент, Н·м (кгс·м)	–	480 (49)
Максимальная скорость, км/ч	117	125
Время разгона до скорости 80 км/ч, с	18	14

но электровакуумного насоса с вакуумным ресивером. Кроме того, для эксплуатации автомобиля при пониженной температуре окружающей среды в стандартном исполнении предусмотрен обогрев салона жидкостным обогревателем, связанным с системой охлаждения ДВС, а для случая движения автомобиля с ГСУ в электрорежиме предусмотрен обогреватель типа «Вебасто», обеспечивающий нормальный тепловой режим двигателя и салона автомобиля.

Испытания образца с ГСУ были проведены сотрудниками кафедры «Автомобили» совместно с представителями ФГУП НИЦИАМТ на полигоне.

Для определения топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ) автомобиля были проведены стендовые испытания согласно правилам ЕЭК ООН №83 и №101 (для автомобилей с ГСУ), в соответствии с которыми расход топлива и количество вредных выбросов автомобиля измеряются в режиме движения по городскому циклу*. Испытательный городской цикл в этом случае формировался посредством суперпозиции (четырёх повторений) простых циклов. Вид и описание простого цикла приведены на рис. 6 и в табл. 1.

Испытания проводились на стенде с беговыми барабанами.

*Использовалась первая часть городского цикла, представляющая наибольший интерес для сопоставления различных схем ГСУ и режимов их работы. Магистральная часть цикла, связанная с обеспечением баланса энергии ГСУ, в данной работе не рассматривалась.

Таблица 1

Элементы простого цикла

Элемент цикла	Параметр				
	Ускорение, м/с ²	Скорость, км/ч	Номер включенной передачи в КП	Продолжительность элемента, с	Общее время, с
Остановка	0	0	Нейтраль	11	11
Ускорение	1,04	0–15	I	4	15
Движение с постоянной скоростью	0	15	I	8	23
Замедление	–0,83	15–0	I	5	28
Остановка	0	0	Нейтраль	21	49
Ускорение	0,69	0–15	I	6	55
Ускорение	0,79	15–32	II	6	61
Движение с постоянной скоростью	0	32	II	24	85
Замедление	–0,81	32–0	II	11	96
Остановка	0	0	Нейтраль	21	117
Ускорение	0,69	0–15	I	6	123
Ускорение	0,51	15–35	II	11	134
Ускорение	0,46	35–50	III	9	143
Движение с постоянной скоростью	0	50	III	12	155
Замедление	–0,52	50–35	III	8	163
Движение с постоянной скоростью	0	35	III	15	178
Замедление	–0,97	35–0	II	10	188
Остановка	0	0	Нейтраль	7	195

Условия стендовых испытаний, используемое оборудование

Климатические условия:	
атмосферное давление, кПа	98
температура, °С	24
влажность, %	54
Топливо	Бензин АИ-92
Испытательный стенд с беговыми барабанами:	
модель	CD-60, фирма Froude (Великобритания)
алгоритм загрузки	$F = 11,57 + 0,07865V^2$
эквивалентная инерционная масса, кг	2150
потребляемая мощность, кВт, при:	
50 км/ч	2,89
80 км/ч	11,44
Газоанализатор	SAE 8539, фирма Yapano (Япония)
Система отбора ОГ	CVS LD-30 фирма AVL (Австрия)

Поскольку стенд не ориентирован для испытаний полноприводных автомобилей, то экспериментальный образец проходил испытания в варианте привода только заднего моста. Целью стендовых испытаний являлось определение расхода топлива при возможно меньшем отрицательном балансе энергии накопителя. При реализации городского цикла для экономии топлива ДВС работал по характеристике минимальных удельных расходов топлива, избыток мощности, развиваемый ДВС, направлялся через электромотор-генератор в накопитель. На режимах повышенного расхода топлива и повышенного содержания вредных выбросов (холостой ход, разгон до невысоких скоростей, торможение двигателем) ДВС выключался.

При этом простой цикл был сформирован из трёх основных частей (см. рис. 6).

Так как первая часть цикла характеризуется невысокой скоростью, её реализация осуществлялась тяговым электродвигателем (ТЭД) в электрорежиме. Во второй части цикла движение на ТЭД целесообразно только на

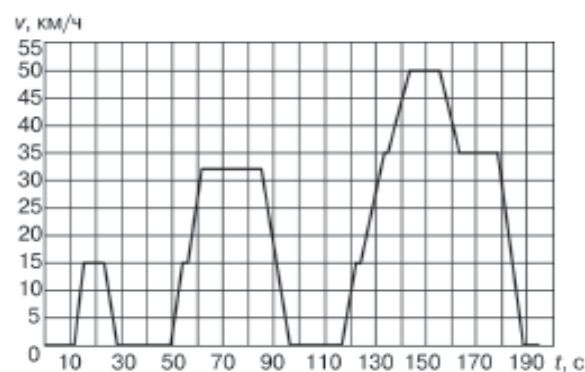


Рис. 6. Испытания автомобиля УАЗ-3153 с ГСУ на стенде с беговыми барабанами

фазе разгона, так как в дальнейшем нужно восполнить запасы энергии, затраченные при движении в электрорежиме. Фаза равномерного движения второй части городского цикла происходит на ДВС, работающем по характеристике минимальных удельных расходов топлива, при этом избыток энергии направляется через ТЭД (режим генератора) в накопитель. Рекуперация энергии происходит и при торможении, причём ДВС в фазе торможения выключается. На третьем этапе городского цикла разгон до 35 км/ч происходит на ТЭД, дальнейший разгон (до 50 км/ч) на ТЭД не целесообразен, так как не обеспечивается требуемое ускорение. Чтобы ускорения соответствовали требованиям городского цикла, разгон от 35 до 50 км/ч происходит на ДВС, работающем по характеристике минимальных удельных расходов топлива, при этом избыток энергии направляется в АБ. Равномерное движение третьей части городского цикла осуществляется на ДВС с рекуперацией энергии (ТЭД – в режиме генератора), замедление – также в режиме генератора. Следующий участок равномерного движения третьей части цикла ТЭД может работать как в режиме тягового электродвигателя, так и в режиме генератора, последнее замедление – в режиме генератора. При этом во всех частях цикла при движении на ДВС в КП может быть включена как третья, так и четвёртая передача. При равномерном движении на третьей передаче запас мощности ДВС больше, поэтому можно зарядить накопитель за меньшее время, т.е. время работы ДВС в цикле будет меньше. Однако чем больше запас мощности, тем больше удельный расход, что может привести к повышенному путевому расходу топлива. Следовательно, целесообразно найти время дополнительной работы ДВС в цикле на обеих передачах и сравнить путевые расходы топлива в обоих случаях.

Таким образом, в рамках стендовых испытаний (рис. 7) были реализованы режимы работы ГСУ для условий равномерного движения, приведённых в табл. 2.

Расход топлива испытываемого образца автомобиля определялся двумя способами: пря-

Таблица 2

Режимы работы ГСУ

Номер режима	Основные показатели режима работы ГСУ для условий равномерного движения
1	Движение со скоростью 35 км/ч происходит на ТЭД
2	То же на ДВС (третья передача), избыток мощности направляется в накопитель
3	То же на ДВС (четвёртая передача), избыток мощности направляется в накопитель

Рис. 7. Стендовые испытания гибридного автомобиля



мым – по расходомеру и косвенным – вычислялся по показаниям газоанализатора. Выполнение городского цикла осуществлялось по прибору водителя, который допускал погрешность по скорости ± 2 км/ч, по времени ± 1 с.

В результате проведенных испытаний экспериментального образца с ГСУ были определены фактические значения его расхода топлива и количества вредных выбросов в ОГ двигателя (табл. 3).

Вместе с тем принималось во внимание то, что для стендовых испытаний автомобилей с ГСУ приняты правила ЕЭК ООН №101, согласно которым при наличии дефицита электрической энергии в городском цикле предусмотрена коррекция показаний расхода топлива с учетом величины дефицита элект-

Основные результаты испытаний

Вариант силовой установки	Параметр				
	Выбросы вредных веществ в ОГ, г/км			Расход топлива по способам определения, л/100 км	
	CO	CH	CO ₂	газоанализатором	расходомером
Штатная (бензиновый ДВС)	17,8	3,43	383	18,8	20,45
Гибридная – режим 1	5,3	1,51	211	9,5	10,2
То же – режим 2	7,5	1,21	225	10,2	10,45
То же – режим 3	9,23	2,1	218	10,1	10,76

Таблица 3

Таблица 4

Результаты расчёта корректирующего коэффициента K_{fuel} и расхода топлива с учётом дефицита электрической энергии

Номер замера	Параметр			
	C_i , л/100 км	Q_i , А·ч	K_{fuel} , л/100 км на А·ч	C_0 , л/100 км
1	11,53	-0,225	3,74	12,37
2	9,64	-0,734		12,39
3	10,93	-0,400		12,43
4	10,93	-0,400		12,43

рической энергии. Коррекция осуществляется по следующим формулам.

1. Корректирующий коэффициент расхода топлива

$$K_{\text{fuel}} = \frac{n \sum Q_i C_i - \sum Q_i \sum C_i}{n \sum Q_i^2 - (\sum Q_i)^2} \cdot \frac{\text{л/100 км}}{\text{А·ч}},$$

где C_i и Q_i – соответственно расход топлива (л/100 км) и электроэнергетический баланс (А·ч), определяемые при i -том испытании, проведенном заводом-изготовителем; n – количество данных.

2. Расход топлива, приведенный к нулевому балансу энергии:

$$C_0 = C - K_{\text{fuel}} Q, \text{ (л/100 км)},$$

где C – расход топлива, измеряемый в ходе испытания (л/100 км); Q – электроэнергетический баланс, измеряемый при испытании (А·ч).

Согласно этому были определены значения рассчитанных в соответствии с требованиями правил №101 ЕЭК ООН приведенных путевых расходов топлива с учетом разницы между измеренной в процессе испытаний энергией, потребленной электродвигателем, и энергией, возвращенной в накопитель генератором. Результаты приведены в табл. 4 для режима 3 (см. табл. 2).

В соответствии с проведенными испытаниями экспериментального образца автомобиля с ГСУ следует отметить, что наличие ГСУ на транспортном средстве обеспечивает существенную экономию топлива, значительное снижение вредных выбросов в ОГ, уменьшение суммарного времени работы ДВС, особенно в местах вынужденной остановки при движении в режиме городского цикла, что положительно сказывается на потребительских качествах гибридных транспортных средств в сравнении с традиционным их исполнением.

СДМ