

Федцов Валерий Владимирович

**[АВТОБУС С ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ](#)**

Адрес статьи: [www.gramota.net/materials/1/2009/12-1/42.html](http://www.gramota.net/materials/1/2009/12-1/42.html)

Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.

Источник

**[Альманах современной науки и образования](#)**

Тамбов: Грамота, 2009. № 12 (31): в 2-х ч. Ч. I. С. 126-131. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: [www.gramota.net/editions/1.html](http://www.gramota.net/editions/1.html)

Содержание данного номера журнала: [www.gramota.net/materials/1/2009/12-1/](http://www.gramota.net/materials/1/2009/12-1/)

**[© Издательство "Грамота"](#)**

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: [www.gramota.net](http://www.gramota.net)

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: [almanac@gramota.net](mailto:almanac@gramota.net)

## АВТОБУС С ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

*Федцов Валерий Владимирович  
МГТУ «МАМИ»*

С конца прошлого века провозглашается, что XXI век должен стать веком экономии топливно-энергетических ресурсов и защиты окружающей среды от промышленных, в т. ч. транспортных загрязнений. В некоторой степени рост цен на топливо, в гораздо большей степени осознание ограниченности запасов нефти, борьба за уменьшение выбросов токсичных веществ при работе двигателей внутреннего сгорания требуют разработки новых источников энергии для транспорта.

Новый источник энергии для транспорта должен быть сравним по удельной мощности, удобству, технологичности в эксплуатации и производстве с массово применяющимися сейчас двигателями внутреннего сгорания. Для быстрого внедрения и, опять же, массовости, новый источник энергии не должен требовать поначалу специальной и дорогостоящей инфраструктуры, позволять производить техническое обслуживание и ремонт на имеющихся технических базах или с их минимальным техническим оснащением. Обучение технического персонала предприятий технического обслуживания также не должно быть длительным и затратным.

Один из вариантов новой силовой установки - гибридная силовая установка (ГСУ), состоящая из первичного двигателя, в подавляющем большинстве конструкций - дизельного<sup>1</sup> и электрической силовой части. Первичный двигатель может работать на любом топливе - как традиционных дизельном, бензине, сжиженном или компримированном газе, так и на альтернативных - водороде, спирте, растительном масле. Электрическая силовая часть состоит из отработанных в производстве и эксплуатации электрических машин, силовых преобразователей и накопителей энергии - аккумуляторов или конденсаторов. Достаточно хорошо отработанные в производстве и эксплуатации агрегаты, объединенные вместе, обеспечивают переход работы силовой установки на новый качественный уровень.

Большинство фирм, производящих автотехнику, разрабатывают и реализуют различные программы, направленные на реализацию мер по снижению загрязнения окружающей среды и экономии топлива. Необходимость скорейшего достижения поставленных целей обуславливается тем, что до 40% добываемой нефти перерабатывается в транспортное, большей частью автомобильное, топливо.

Проблема снижения загрязнения окружающей среды и уменьшения потребления транспортного нефтяного топлива актуальна до такой степени, что гибридные силовые установки разрабатывается и для других видов транспорта - как пример, можно привести дизель-электрические железнодорожные моторные вагоны (Япония, Англия), и даже отдельные виды армейской техники (США).

К достоинствам ГСУ относится сочетание достоинств ДВС (запас топлива достаточно удобен в хранении, заправка, транспортировке, занимает небольшой объем на транспортном средстве и обеспечивает значительный пробег) и электрического привода (близкая к оптимальной характеристика электродвигателя позволяющая отказаться в трансмиссии от агрегатов, изменяющих передаточное число, достаточная компактность, возможность рекуперации энергии).

При разработке гибридных силовых установок решаются следующие задачи:

- совершенствование двигателя (ДВС), используемого в качестве первичного;
- совершенствование электрических машин, силовой управляющей электроники и накопителей электроэнергии;
- оптимизация параметров агрегатов ГСУ и алгоритма их совместной работы.

Существенным фактором, влияющем на необходимость срочной разработки ГСУ для городских автобусов то, что, несмотря на постоянное совершенствование ДВС, экологические характеристики автобусов оставались примерно на 15-32% хуже, чем аналогичные показатели троллейбусов сравнимой полной массы и пассажиролемкости. Большой разброс цифр характеризует, в первую очередь, сложность оценки экологического вреда при производстве электроэнергии на электростанциях (ГЭС, АЭС, ТЭС) и процентном соотношении энергии, выработанной на каждом типе электростанций и потребляемой при эксплуатации троллейбуса.

Практически все время уменьшение потребления топлива на наземном транспорте, в том числе автобусах, достигалось путем уменьшения снаряженной массы транспортного средства при сохранении пассажиролемкости, улучшения, оптимизации процесса сгорания топлива в двигателях, уменьшения потерь в двигателях и трансмиссии. В среднем за последние три десятилетия автобусы стали легче на 20-30%, расход топлива и снизился на 20-25%.

Однако и сейчас можно отметить такие недостатки автобусов, как относительно высокую шумность при работе и значительный уровень токсичности выхлопных газов.

Главной же целью при разработке новых автобусов должно стать существенное улучшение экологических и топливно-экономических характеристик. Радикальным решением этой проблемы было бы применение двигателей, при работе которых не образуется токсичных веществ.

Часто как пример таких двигателей называют двигатели, использующие в качестве топлива водород (хо-

<sup>1</sup> В качестве первичного двигателя в ГСУ может использоваться практически любой двигатель.

тя, по большому счету, на сегодняшний день сложно оценить экологический ущерб при производстве водорода) или использование топливных элементов в качестве источника энергии (на современном этапе развития технологии такое решение чрезвычайно дорогостоящее и оставленное на перспективу).

На современном этапе развития технологий как оптимальное решение может быть гибридная (комбинированная) силовая установка, состоящая из двигателя внутреннего сгорания (как правило, дизельного), одной или нескольких электрических (обратимых) машин и накопителя электроэнергии - аккумуляторной (конденсаторной) батареи.

ГСУ, применяемые в настоящее время на автомобильном транспорте, можно разделить на четыре принципиально различные схемы: последовательную, параллельную, SPLIT и STRIGEAR. Две последние, впрочем, можно объединить в одну группу и назвать параллельно-последовательными (смешанными) (Рис. 1).

Двигатель при движении обычного автомобиля в каждый момент времени развивает мощность, равную требующейся в данный момент. Как следствие, двигатель работает в широком диапазоне частот вращения и нагрузок и, соответственно, часть (большую часть, как правило) времени работает на режимах, далеких от оптимальных, с высокими значениями удельного расхода топлива и значительной токсичностью выхлопных газов.

В гибридной силовой установке первичный двигатель (ПД) работает в весьма узком диапазоне частот вращения и нагрузок, а иногда и на постоянном режиме. Причем сам ПД имеет мощность вдвое - вчетверо меньше мощности обычного двигателя. В то время, когда требующаяся для движения мощность меньше той, которую вырабатывает ПД, излишек мощности запасается в накопителе. В то время, когда требующаяся для движения мощность больше той, которую вырабатывает ПД, недостаток мощности забирается из накопителя. В различных схемах ГСУ этот принцип работы реализуется по-разному.

В ГСУ последовательной схемы первичный двигатель (ПД) приводит только первичный генератор (ПГ) и вся мощность ПД преобразуется в электрическую. Ведущие колеса приводит только тяговый электродвигатель (ТЭД). Соответственно, на режимах движения, когда мощность, потребляемая ТЭД, меньше той, что вырабатывает ПГ, основная часть электрической энергии с ПГ идет на ТЭД, а остаток запасается в накопителе (НК). На режимах движения, когда мощность, потребляемая ТЭД, больше той, что вырабатывает ПГ, недостаток берется из накопителя. ПД как правило, работает на фиксированном режиме, с минимальными значениями удельного расхода топлива.

В ГСУ параллельной схемы ПД механически связан с колесами и работает в некотором диапазоне частот вращения и нагрузок. Ведущие колеса могут приводиться как ТЭД, так и ПД, как по отдельности, так и вместе. На режимах движения с малыми затратами энергии колеса приводит только ТЭД, ПД выключен. При увеличении затрат энергии запускается ПД. Часть мощности с ПД на колеса идет по механической трансмиссии. При избытке мощности избыток мощности отбирается генератором и преобразуется в электрическую энергию, запасаемую в накопителе. При недостатке мощности ПГ переходит в режим ТЭГ и совместно с ПД приводит ведущие колеса, получая энергию из накопителя.

В ГСУ системы СПЛИТ часть энергии передается на колеса механической трансмиссией через планетарную передачу. Водило планетарной передачи связано с валом ПД, солнечная шестерня - с валом генератора, внешнее колесо - с валом ТЭД, связанным с ведущими колесами. Практически не изменяя режима работы ПД, изменяя силу тока в управляющих обмотках ПГ, можно регулировать отбираемую ПГ мощность а, следовательно, и мощность, передаваемую через планетарную передачу. Управляя мощностью ТЭД, можно регулировать скорость движения.

Поскольку на одних режимах движения большой КПД имеет ГСУ последовательной схемы, на других - ГСУ параллельной схемы, то резонно возникает идея создать ГСУ, которая на одних режимах движения будет работать как ГСУ последовательной схемы, на других - параллельной. ГСУ схемы STRIGEAR когда сцепление между КПП и ТЭД разомкнуто работает как ГСУ последовательной схемы, и когда сцепление замкнуто - как ГСУ параллельной схемы.

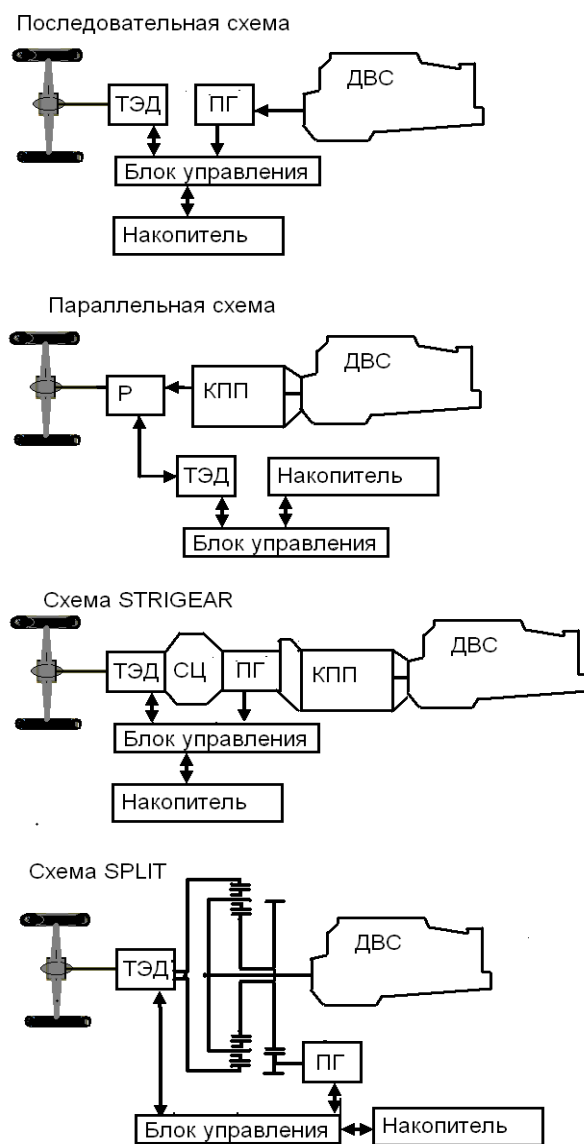
В силу конструктивных особенностей для каждого типа ГСУ существуют некоторые ограничения по эффективности применения на тех или иных транспортных средствах. Практически все ГСУ городских автобусов, созданные до сегодняшнего дня, сделаны по последовательной схеме по следующим причинам:

- Автобус работает в широком диапазоне нагрузок (из-за изменяющегося количества перевозимых пассажиров), любая схема, в которой первичный двигатель (ПД) механически связан с колесами, потребует изменение режимов его работы, что значительно ухудшит экономические и экологические показатели. В ГСУ последовательной схемы изменится только время работы ПД в цикле, что сохранит минимальную токсичность выбросов.

- Привод колес только ТЭД и отсутствие механической связи ведущих колес с ПД делает ненужным КПП.

- в ГСУ последовательной схемы независимо от скорости движения автобуса можно задавать ПД режим постоянной частоты вращения и нагрузки, выбрав при этом наиболее экономичный, с минимальным уровнем токсичных выбросов.

- Постоянный режим работы ПД обеспечивает возможность наиболее оптимально согласования работы ПД и ПГ.



**Рис. 1.** Принципиальные схемы гибридных силовых установок: ТЭД - тяговый электродвигатель; ПГ - первичный генератор; СЦ - муфта (сцепление); КПП - коробка перемены передач

Первичный двигатель выбирается по мощности. Минимальная мощность определяется из условия обеспечения возможности прохождения заданного стандартного цикла. Возможно применение ПД с большей мощностью. Как показывают расчеты, при росте мощности ПД сначала расход топлива несколько уменьшается, потом начинает расти.

Первичный генератор выбирается из электрических машин с наиболее высоким КПД, это, как правило, асинхронный генератор.

Тяговый электродвигатель выбирается из условия обеспечения возможности движения в тех или иных условиях.

#### Системы оборудования автобуса

На транспортном средстве с ГСУ от ПД нельзя приводить насос ГУР, компрессор пневмосистемы и другие навесные агрегаты, так как ПД может часть времени не работать. Привод этих агрегатов наиболее рационально осуществить от отдельных электродвигателей.

#### Блок управления

Блок управления и силовой преобразователь, регулирующий напряжение и частоту тока может быть выполнен на элементной базе мощных биполярных транзисторов, что обеспечит малое потребление энергии системой управления, точность и быстродействие системы управления

#### Накопитель

Накопитель должен иметь возможность принимать ток большой силы (на режиме торможения), сохранять полученную энергию и выдавать ток большой силы (на режиме разгона), иметь достаточную емкость, минимально возможный вес и минимальные габариты.

В качестве накопителя можно использовать как конденсаторную, так и аккумуляторную батарею или их комбинацию.

Поскольку силовое электрооборудование автобуса с ГСУ работает при высоком напряжении и потребляет значительную мощность, при выборе накопителя энергии, прежде всего, необходимо учитывать удельные (по массе) плотность энергии и плотность мощности, а также учитывать характеристики накопления электроэнергии (возможность запасаания электроэнергии большой мощности), вырабатываемой при рекуперативном торможении.

Основные характеристики различных накопителей приведены в Таблице 1.

**Табл. 1.** Характеристики накопителей энергии, усредненные

Тип накопителя	Плотность энергии, Вт*ч/кг	Плотность мощности, Вт/кг	Срок службы, циклов	Стоимость
Конденсаторный	6	500	Неограничен	Высокая
Маховиковый	50	1000	Неограничен	Умеренная
Свинцово-кислотный	40	300	500	Низкая
Никель-металл.	40-70	200-700	1000	Умеренная
Литиево-ионный	30-130	300-1400	1000	Высокая

Видно, что преимущество имеют никель-металлические и литиево-ионные аккумуляторы. Никель-металлические аккумуляторы дешевле литиево-ионных при тех же значениях емкости и запасаемого и выдаваемого токов но практически вдвое тяжелее их.

Вес и срок службы аккумуляторов являются немаловажными аспектами и самым прямым образом влияют на рентабельность эксплуатации автобуса с ГСУ.

Если применить более дешевые, но имеющие значительно больший вес аккумуляторы, то придется для сохранения полной массы автобуса уменьшить пассажироместимость. А значит, возрастет стоимость перевозки одного пассажира и снизится рентабельность эксплуатации автобуса. При выборе аккумуляторов имеет смысл сравнивать только сумму стоимости самих аккумуляторов и общую стоимость их обслуживания за весь срок эксплуатации, отнесенную к сроку эксплуатации. В итоге получается, что изначально сами по себе более дорогие литиево-ионные аккумуляторы, требующие более дорогого обслуживания, но имеющие меньший вес и значительно дольше работающие, применять выгоднее.

Характеристики батареи прямо связаны с ее емкостью. Чем больше емкость и мощность батареи, тем выше ее КПД (меньше потери энергии) при запасаании и выдаче токов большой силы, что, в первую очередь, обусловлено меньшим нагревом по сравнению с нагревом батареи малой мощности.

Согласно данным испытаний, проводимым компаниями-изготовителями, наибольший срок службы литиево-ионной аккумуляторной батареи достигается при ее эксплуатации с зарядом от 20-25% до 55-65% полной емкости.

При разработке ГСУ особое внимание следует уделить системе управления для обеспечения оптимального использования энергии, получаемой с ПГ и максимально полного сохранения рекуперационной энергии.

Система управления должна отвечать таким требованиям, как:

1. С точки зрения экономии энергии: возможно более полное сохранение энергии рекуперативного торможения, обеспечение работы ПД в оптимальном режиме.

2. С точки зрения охраны окружающей среды: При движении с низким энергопотреблением (движении с низкой скоростью, движении под уклон) и во время остановок автобус с ГСУ должен получать энергию от аккумуляторной батареи, работа ПД крайне нежелательна, так как создаст локальные концентрации выхлопных газов.

Поскольку величина энергии, которую можно получить при рекуперации, пропорциональна кинетической энергии автобуса, а кинетическая энергия пропорциональна массе и квадрату скорости движения, то величина допустимого уровня энергии в батарее в зависимости от скорости будет иметь квадратичную зависимость.

Зависимость допустимого уровня энергии в аккумуляторе от скорости наглядно можно представить на графике (Рис. 2).

Существенным является определение «запретных зон» для работы ПД. ПД не должен работать на остановках, так как это создает локальные концентрированные «зоны загрязнения», причем около скопления пассажиров. Нежелательна работа ПД при движении с невысокой скоростью, подъезде к остановкам и отъезде от них, когда количество выбросов на единицу пройденного пути будет высоким. Нежелательна работа ПД при рекуперативном замедлении, что значительно увеличит запасаемую накопителем мощность.

Оптимальная зона для работы ПД - движение с высокими скоростями, когда количество выхлопных газов на единицу пути становится невысоким. Конечно, понятия «невысокая скорость» и «высокая скорость» предельно условны - скорость, при которой ПД включается, должен определяться полным энергетическим балансом при прохождении цикла. Эта скорость будет зависеть как от мощности ПД, характеристик накопителя, так и загрузки автобуса.

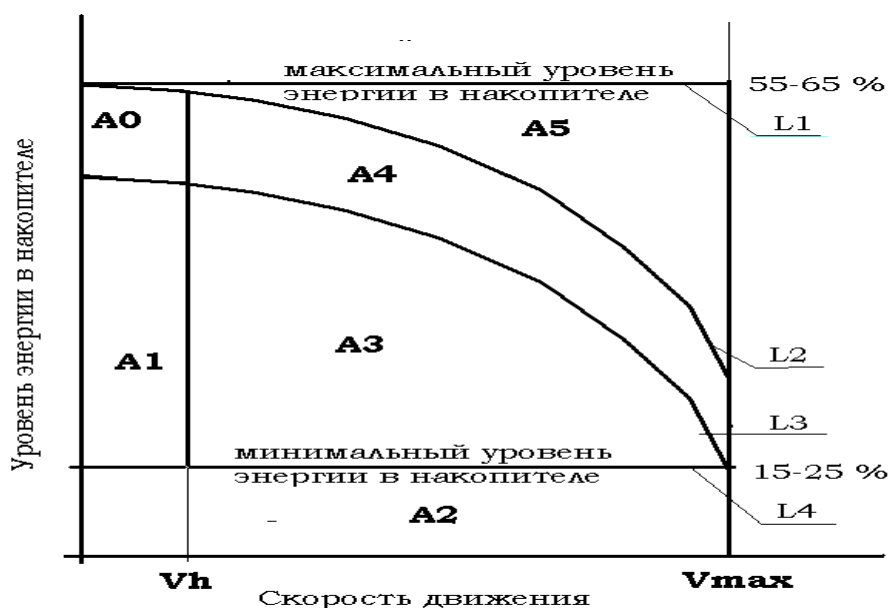


Рис. 2. Схема работы накопителя. Пояснения в Табл. 2 и 3

Табл. 2. Границы зон работы накопителя

L1	Максимальный эксплуатационный уровень энергии в накопителе. Энергия на таком уровне может быть только на остановке (55-65% номинальной емкости).
L2	Максимально допустимый уровень энергии в накопителе в процессе движения, обеспечивающий возможность полного сохранения рекуперационной энергии. При уровне энергии выше этого значения накопитель может не принять всю энергию рекуперации.
L3	Минимально допустимый уровень энергии в накопителе в процессе движения, обеспечивающий возможность прохождения цикла. При уровне энергии в накопителе после приема рекуперационной энергии накопитель не будет полностью заряжен.
L4	Минимальный эксплуатационный уровень энергии в накопителе. Энергия на таком уровне может быть только в последний момент движения с максимальной скоростью перед рекуперационным торможением. Уровень энергии соответствует 15-25% номинальной емкости.
V max	Максимальная скорость автобуса.
V h	Скорость, до достижения которой ПД выключен.

Табл. 3. Зоны работы накопителя

A0	Движение с малым расходом энергии. ПД не работает. Зона может рассматриваться как обособленная часть зоны A4.
A1	Движение с малым расходом энергии. Поскольку уровень энергии в накопителе меньше L3, для создания необходимого уровня энергии в накопителе ПД работает.
A2	«Неприкосновенный» запас энергии, попадание в эту зону крайне нежелательно. ПД будет работать в любых условиях. Возможно, потребуется остановка или движение с меньшей, чем предписано циклом, скоростью для того, чтобы поднять уровень энергии выше L3.
A3	Уровень энергии в накопителе меньше минимально допустимого по условию прохождения цикла. При таком уровне энергии после рекуперации энергии уровень энергии будет меньше необходимой величины. L3. ПД в обязательном порядке работает.
A4	Зона оптимальной величины уровня энергии в накопителе. Часть времени движения ПД может не работать. Уровня энергии в накопителе в этой зоне гарантирует, что, с одной стороны, накопитель в любых условиях сумеет принять всю энергию рекуперации, и, с другой стороны, энергии в накопителе хватит для прохождения цикла.
A5	Уровень энергии выше максимально допустимого при данной скорости, создается опасность того, что накопитель не сможет принять всю энергию рекуперации. ПД ни при каких условиях не работает.

Автобус с ГСУ экономически целесообразно строить, максимально используя серийно выпускаемые промышленностью узлы и агрегаты, включая готовые кузова автобусов. Возможны два основных варианта.

Вариант 1: Автобус с ГСУ создается на базе городского автобуса большого класса. С серийного автобуса снимается двигатель, коробка передач и устанавливаются агрегаты ГСУ.

Тяговый электродвигатель устанавливается на место коробки передач и соединяется с ведущим мостом карданным валом. В качестве ТЭД тягового электродвигателя логично использовать троллейбусный ТЭД. Достоинство такого решения - значительный опыт эксплуатации этих двигателей (автобусы с ГСУ «приписывать» к троллейбусным паркам), возможность прохождения части пути с питанием от контактной трол-

лейбусной сети.

Генераторная установка состоит из ПД и ПГ, размещается поперечно в заднем свесе автобуса, на месте, где стоял двигатель. За основу генераторной установки возможно взять готовые серийные дизель-генераторные станции.

Основное силовое электрооборудование, включая накопители, можно разделить на несколько блоков и разместить их как под полом салона, на крыше, так и в специальных выгородках около силового отсека.

Вариант 2: Дизель-генераторная установка, система управления и накопитель устанавливаются на серийный троллейбус.

Все городские автобусы и троллейбусы большого класса имеют примерно одинаковые весовые параметры и габаритные размеры, поэтому одна и та же гибридная силовая установка может быть смонтирована практически на любой автобус или троллейбус. Основные различия будут в компоновочных решениях.

Несомненно, решающее заключение о целесообразности изготовления автобуса с ГСУ возможно дать только по результатам ходовых испытаний опытного образца.

В качестве предварительной характеристики автобуса с ГСУ можно сказать следующее. Автобус с ГСУ должен расходовать топлива несколько меньше автобуса с ДВС в основном за счет полезного использования энергии рекуперативного торможения в условиях движения по коротким перегонам между остановками и светофорами, с частыми разгонами и замедлениями. При эксплуатации на маршрутах с подъемами и спусками, при движении на подъем потребление энергии возрастает на набор потенциальной энергии. При движении под уклон появляется возможность рекуперации, перевода потенциальной энергии в электрическую и ее запасания в накопителе. Однако, но на маршрутах движения с большими перепадами высот емкость накопителя будет недостаточной для сохранения всей энергии, из-за чего эффективность ГСУ будет несколько ниже.

Для обеспечения возможности эксплуатации автобуса с ГСУ на таких маршрутах потребуется установить в трансмиссии (как вариант) гидравлический тормоз-замедлитель или тормозные реостаты, подобно тому, как это сделано на автомобилях с электрической трансмиссией. Несомненно, при эксплуатации автобуса с ГСУ на негоризонтальных дорогах эффективность ГСУ будет зависеть от способности накопителя полностью сохранить рекуперированную потенциальную энергию, то есть от соотношения относительных превышений, профиля маршрута и емкости накопителя.

#### АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ВЕЛИЧИН УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ТОПЛИВА ДВИГАТЕЛЕМ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

*Федцов Валерий Владимирович  
МГТУ «МАМИ»*

При проектировании автомобилей важную роль играет расчет топливно-экономических характеристик, позволяющий оценить величины расхода топлива на различных режимах и, при возможности выбора двигателя из нескольких, выбрать наиболее подходящий не только по тягово-динамическим, но и топливно-экономическим характеристикам.

Для проведения расчета топливно-экономических характеристик автомобиля необходимо знать удельный расход топлива (УРТ) в каждый момент времени. Основной проблемой при проведении такого расчета является то, что величина УРТ может быть представлена как функция двух переменных - частоты вращения двигателя и процента его загрузки и изменяется в зависимости от сочетания этих параметров по достаточно сложному закону. Зависимость изменения величины УРТ, как от оборотов при постоянном значении нагрузки, так и от величины нагрузки при постоянном значении оборотов не является линейной, кривые зависимостей ближе всего к кривым степенных функций.

Точно определить величины УРТ возможно только при испытаниях двигателя в различных режимах. Для большинства двигателей возможно найти в литературе значения удельного расхода топлива - обычно для 5-6 величин нагрузки по 5-6 величинам частот вращения.

Такие ограниченные данные предопределяют весьма низкую точность расчета. В самом простом варианте расчета приходится по этим данным построить графики, отражающие зависимость удельного расхода топлива от оборотов и нагрузки, в ходе расчета необходимые величины УРТ вручную снимать с графиков. К существенным недостаткам такого метода можно отнести большой объем ручной, монотонной, малопродуктивной чисто механической работы, в ходе которой не исключены ошибки, невысокая точность, обусловленная аппроксимацией данных при построении графиков по точкам, большие затраты времени.

Для автоматизации расчетов необходимо иметь формулы, позволяющие определить величины УРТ на тех или иных режимах работы. Однако до настоящего времени простой и точной формулы, позволяющей рассчитать величины УРТ, не получено.

В справочной и учебной литературе можно найти зависимости, позволяющие получить оценочные величины УРТ. Именно оценочные, достаточно приближенные и использование которых для инженерных расчетов нежелательно.