

## РАЗРАБОТКА КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМЫ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

*Р.Ю. Илимбетов, А.М. Астапенко*

Обоснована актуальность применения комбинированной энергетической установки в конструкции грузового автомобиля. Приведен анализ возможных компоновочных схем комбинированной энергетической установки для разработки грузового автомобиля с улучшенными экологическими показателями на базе автомобиля Урал-4320.

*Ключевые слова:* загрязнение окружающей среды, гибридная установка, комбинированная энергетическая установка, мотор-колесо, грузовой автомобильный транспорт.

**Введение.** Актуальность проблемы экологии автомобильного транспорта во всем мире с каждым годом возрастает, так как на его долю приходится большая часть загрязнений окружающей среды. Серьезными проблемами также являются производимый транспортом шум и заторы на улицах города.

Из графика, представленного на рис. 1, видно, что на транспорт приходится большая часть загрязнений атмосферы окислами углерода [1].



Рис. 1. Изменение годового выброса CO<sub>2</sub> в атмосферу за период с 2000 по 2011 г.

Двигатель внутреннего сгорания (далее ДВС), приводящий автомобили в движение уже второе столетие, плохо пригоден для городского цикла. С увеличением загрузки городских улиц средняя скорость движения становится все меньше, а расход топлива и количество токсичных выбросов, наоборот, растут.

Учитывая тот факт, что 78 % грузовых автомобилей в России имеют экологический класс не выше Евро-1, то научные и конструкторские работы, направленные на снижение содержания вредных веществ в отработавших газах, являются актуальными (рис. 2) [1].

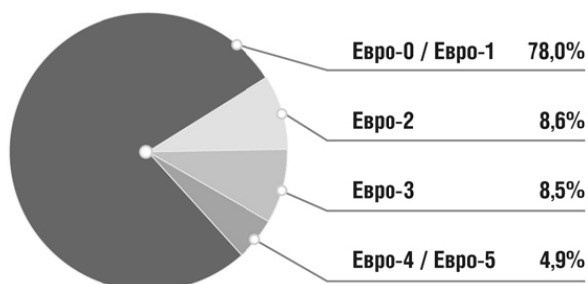


Рис. 2. Структура российского парка грузовых автомобилей по нормам токсичности за 2010 год

Создать оптимальный режим работы ДВС с точки зрения расхода топлива и токсичности отработавших газов, а также позволить применить систему рекуперации кинетической энергии при торможении грузовых автомобилей могут комбинированные энергетические установки, разработки которых ведутся во всем мире на протяжении уже многих десятилетий [2].

**Комбинированные энергетические установки (КЭУ).** Основным вектором развития автомобилестроения в последнее время является внедрение в конструкцию транспортных средств гибридных установок. Под гибридной или комбинированной силовой энергоустановкой подразумевают комплексную силовую установку, состоящую из поршневого ДВС, тягового электродвигателя (одного или нескольких), электрогенератора, накопителя электроэнергии (аккумуляторных батарей или суперконденсаторов) и системы микропроцессорного управления и оптимального регулирования (рис. 3). Применение аккумуляторных батарей гораздо меньшей емкости, чем в электромобилях, снизило остроту проблемы утилизации использованных аккумуляторов, что также является актуальным выбором в решении экологических проблем [3].



Рис. 3. Основные компоненты комбинированной энергетической установки

Главное преимущество автомобилей с КЭУ – снижение расхода топлива и вредных выхлопов. Это достигается за счет полной автоматизации управления работой двигателей с помощью бортового компьютера – начиная от своевременного отключения двигателя во время остановки в транспортном потоке, с возможностью немедленного возобновления движения без его запуска, исключительно на запасенной в накопителе энергии, и заканчивая более сложным механизмом рекуперации – использование кинетической энергии движущегося автомобиля при торможении для зарядки накопителя при работе электродвигателя в режиме электрогенератора.

Многие мировые лидеры грузового автомобилестроения серийно выпускают гибридные грузовики (MAN, VOLVO, DAF, IVECO и др.) [3]. Российские автопроизводители также заинтересованы в исследованиях, аналитических обзорах и разработках, связанных с адаптацией гибридной установки на отечественные грузовые автомобили.

До недавнего времени, основной проблемой для внедрения гибридной установки в конструкции автомобилей являлась высокая стоимость подобных схем, вызванная, в частности, ценой на силовую электронику, электрические машины и накопители электроэнергии (аккумуляторные батареи и суперконденсаторы). Однако в настоящее время, разработаны как экономически оправданные преобразовательные силовые устройства и электрические машины для автотранспорта, так и эффективные накопители электрической энергии. Все это позволяет создать экономически оправданную систему комбинированной энергетической установки [4].

**Преимущества комбинированной энергетической установки.** Комбинированная энергетическая установка (см. рис. 3) имеет множество преимуществ перед традиционной компоновочной схемой автомобиля «ДВС – механическая трансмиссия» [5]:

- 1) низкий расход топлива;
- 2) высокие экологические показатели транспортного средства;
- 3) низкий уровень шума;
- 4) смягчение электродвигателем всех неблагоприятных рабочих диапазонов ДВС;
- 5) отсутствие стартера и генератора (в зависимости от выбранной схемы комбинированной энергетической установки);

## Расчет и конструирование

- б) минимизация износа тормозных механизмов за счет регенерации энергии при торможении;
- 7) обеспечение наиболее широкого диапазона автоматического изменения крутящего момента и силы тяги;
- 8) отсутствие жесткой кинематической связи между агрегатами электромеханической трансмиссии, что позволяет создавать различные компоновочные схемы.

**Варианты компоновки комбинированной энергетической установки.** При модернизации трехосного грузового автомобиля, возможно использование нескольких вариантов компоновки комбинированной энергетической установки.

Один из вариантов – компоновка комбинированной энергетической установки с общим электродвигателем (рис. 4), располагает к наибольшей унификации с автомобилем с механической трансмиссией. Он заключается в передаче крутящего момента с электродвигателя на карданные валы без использования коробки передач. При этом кинематика модернизированного автомобиля остается такой же, как и у базового автомобиля. Достигается более высокий показатель экологичности и плавности хода, старта. Ресурс двигателя внутреннего сгорания повышается. Снижается утомляемость водителя транспортного средства. Из минусов данного решения компоновки комбинированной энергетической установки можно выявить снижение КПД трансмиссии, увеличение общей массы системы, а также добавление силовой электроники, требующей микропроцессорного управления.

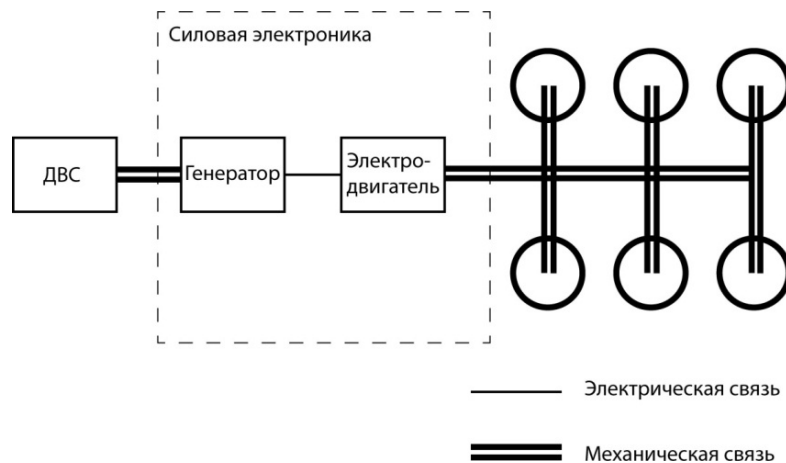


Рис. 4. Компоновка комбинированной энергетической установки с общим электродвигателем

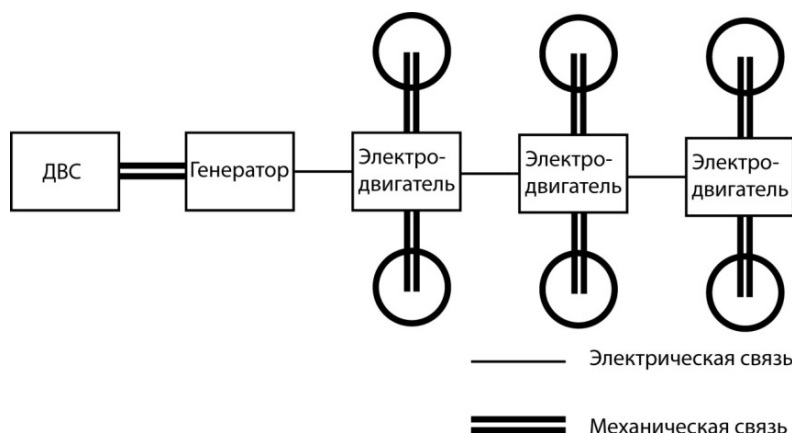


Рис. 5. Компоновка комбинированной энергетической установки с электродвигателем на ось

Другой вариант – компоновка комбинированной энергетической установки с электродвигателем на ось (рис. 5), позволяет уменьшить количество механических частей трансмиссии, но это сказывается на унификации с базовым автомобилем. В данной конструкции появляется возможность подключения электродвигателей по мере необходимости и в зависимости от дорожных условий, что положительно сказывается на ресурсе, экологичности и проходимости модернизированной

ванного автомобиля. Возникает проблема программной синхронизации электродвигателей при данной компоновке трансмиссии. Поэтому необходима установка дополнительных контроллеров и датчиков, а так же систем контроля движения (ABS, ESP).

Наиболее перспективным вариантом комбинированной энергетической установки является использование мотор-колес. При данном варианте можно максимально уйти от механической части трансмиссии и максимально уменьшить подрессоренную массу. Схема компоновки представлена на рис. 6.

При применении данного вида компоновки получаем независимую подвеску, центр тяжести автомобиля смещается ближе к дорожному полотну. Появляется возможность взаимозаменяемости мотор-колес и рекуперации энергии.

Основными критериями, определяющими целесообразность применения индивидуального электропривода с мотор-колесами на грузовых автомобилях взамен механического, являются следующие:

- 1) снижение вредных выбросов в окружающую среду на 30–40 %;
- 2) уменьшение расхода топлива на 20–30 %;
- 3) уменьшение веса агрегатов и узлов привода в сравниваемых вариантах;
- 4) повышение эксплуатационных свойств (надежность в работе, объем и периодичность технического обслуживания);
- 5) повышение КПД системы привода;
- 6) уменьшение стоимости агрегатов и узлов привода в сравниваемых вариантах и эксплуатационных расходов за расчетный срок службы.

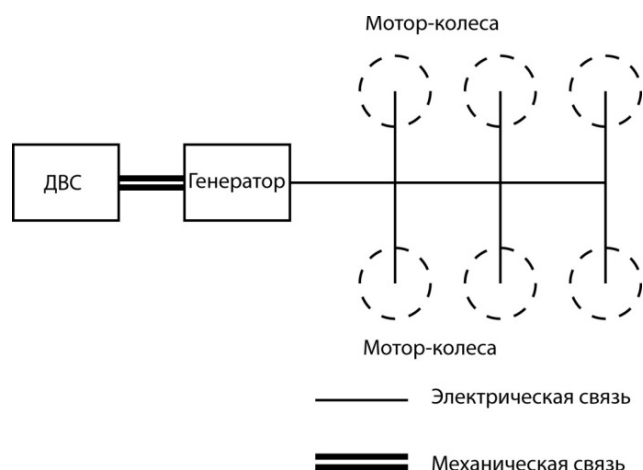


Рис. 6. Компоновка комбинированной энергетической установки с электродвигателями «мотор-колесо»

Характерной особенностью конструкции мотор-колеса является весьма рациональная компоновка его элементов, в частности, размещение электродвигателя полностью или частично внутри обода колеса, а также сведение к минимуму числа и размеров деталей механической передачи.

**Алгоритм работы комбинированной энергетической установки.** Был разработан алгоритм работы комбинированной энергетической установки (рис. 7).

В данном алгоритме предусмотрены различные режимы работы комбинированной энергетической установки:

1. Режим пуска двигателя. Происходит инициализация блока управления, управляющий сигнал по шине передачи данных CAN, передается на преобразователь в бортовое напряжение и инвертер. Далее генератор переводится в стартерный режим и запускает двигатель.

2. Режим хода. Момент с двигателя внутреннего сгорания передается на генератор, который передает энергию на инвертер, питающий блок электродвигателей, а так же производит заряд блока ионисторов.

3. Режим торможения. Управляющий сигнал с блока управления переводит блок электродвигателей в режим торможения. Далее рекуперированная энергия с блока электродвигателей поступает в блок ионисторов.

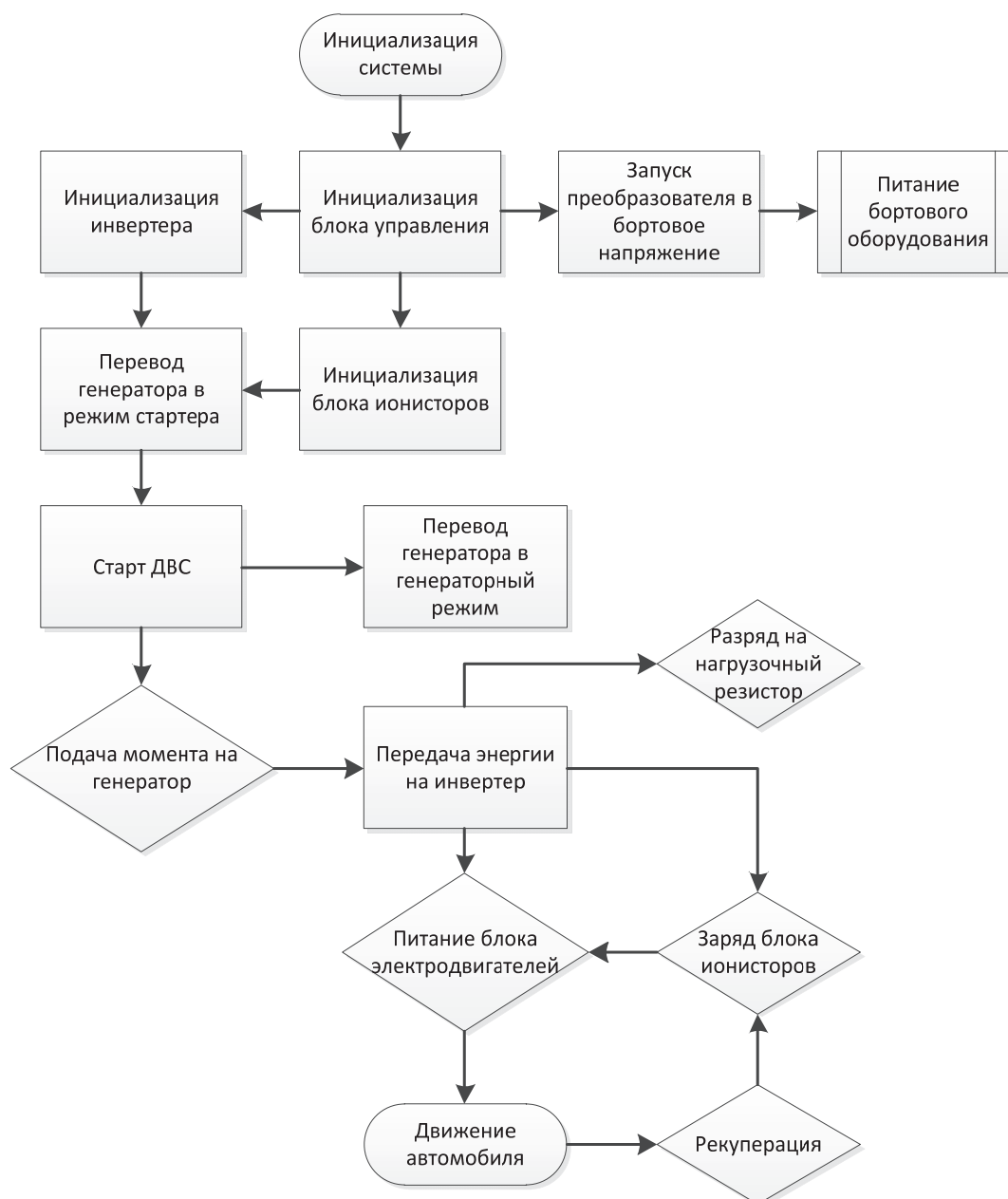


Рис. 7. Алгоритм работы комбинированной энергетической установки с электродвигателями «мотор-колесо»

4. Режим рекуперации и движения на рекуперированной энергии. При торможении электроэнергия с блока электродвигателей поступает в блок ионисторов, тем самым заряжая их. Накопленная рекуперированная энергия впоследствии используется для питания блока электродвигателей.

**Энергетический расчет электродвигателей гибридной силовой установки трехосного грузового автомобиля на базе автомобиля УРАЛ-4320.** Наиболее перспективным вариантом являются вентильные электродвигатели. Они характеризуются компактностью и высокой удельной мощностью на единицу веса. КПД вентильного электродвигателя достигает величины 90 % и выше.

Для расчета мощности электродвигателя зададимся исходными данными автомобиля (автомобиль УРАЛ-4320): полная масса – 8020 кг; коэффициент трения качения по асфальту – 0,03; коэффициент обтекаемости кузова – 0,7; площадь лобового сопротивления – 7 м<sup>2</sup>; максимальная скорость движения 85 км/ч [6].

Требуемая мощность электродвигателя автомобиля:

$$N = g \cdot F_{\text{тр}} \cdot m \cdot V + C_x \cdot S \cdot V^2 + g \cdot m \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $F_{\text{тр}}$  – трение качения по асфальту;  $m$  – полная масса транспортного средства;  $V$  – скорость движения, максимальная;  $C_x$  – коэффициент обтекаемости, мидель;  $S$  – лобовая площадь кузова;  $\alpha$  – угол наклона дорожного полотна.

Применив указанную формулу для нашего случая, имеем:

$$N = 9,8 \cdot 0,03 \cdot 8020 \cdot 23,6 + 0,7 \cdot 7 \cdot 23,6^2 + 9,8 \cdot 8020 \cdot \sin 20 \quad (2)$$

$$N = 130128 \text{ Вт.} \quad (3)$$

Для движения автомобиля по асфальту со скоростью до 85 км/час и допустимых подъемах 20 % дорожного полотна необходима мощность на колесах 130 кВт. Необходимо учесть КПД узлов автомобиля с КЭУ. КПД двигателя 0,8; КПД редуктора главной передачи 0,9; КПД контроллера с потерями на проводах и контакторах – 0,9. Итоговый КПД кинематики автомобиля имеем

$$\text{КПД} = 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 0,65. \quad (4)$$

Реальная общая мощность электродвигателей определяется по выражению:

$$N_{\text{п}} = \frac{N}{\text{КПД}} = \frac{130128}{0,65} = 200196 \text{ Вт.} \quad (5)$$

Исходя из расчета, нам понадобится вентильный электродвигатель мощностью 200 кВт. Возьмем шесть электродвигателей YASA-750-motor (рис. 8) [7]. Постоянная мощность данного электродвигателя превышает необходимые требования, однако, по причине того, что это самый маломощный электродвигатель в линейке моделей двигателей компании Yasa Motors, то мы выбрали именно его. Также, необходимо заметить, что основным недостатком электродвигателя является то, что при снижении напряжения питания резко уменьшается крутящий момент электродвигателя, а, значит, и мощность, т. е. при снижении напряжения АКБ на 44 % крутящий момент уменьшается в 2 раза. Поэтому в нашем случае мощность электродвигателя YASA-750-motor, равная 55 кВт, будет оптимальной. Параметры электродвигателя представлены в таблице.

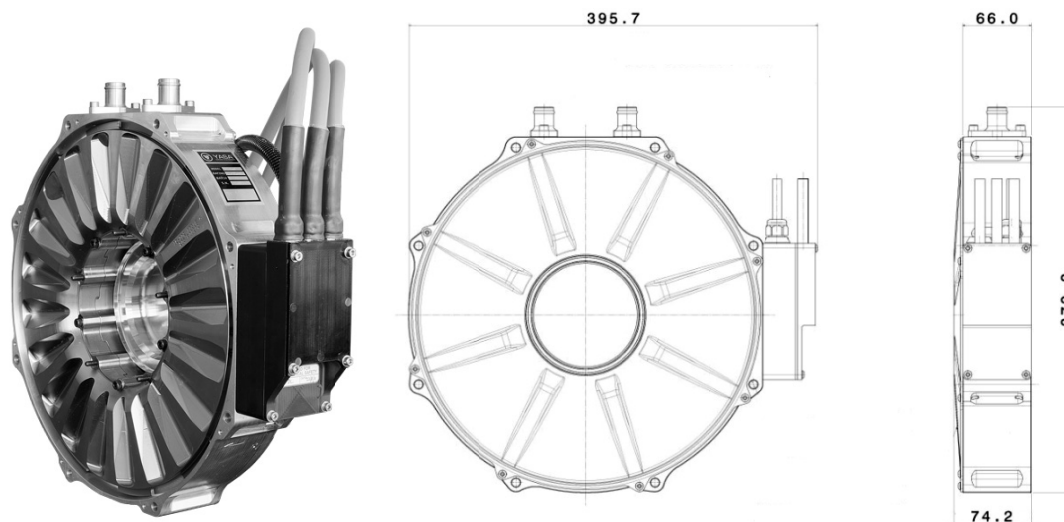


Рис. 8. Электродвигатель YASA-750-motor

Характеристики электродвигателя YASA-750-motor [7]

Параметр	Значение
Масса	25 кг
Максимальная пиковая мощность	100 кВт
Пиковый крутящий момент	750 Нм
Постоянная мощность	55 кВт
КПД	94 %
Обороты в минуту	2500 об/мин

### Выводы

1. Эксплуатация грузового автомобильного транспорта сопряжена с множеством проблем. На его долю приходится значительная часть общего количества выбросов, загрязняющих окружающую среду. Учитывая тот факт, что в России большая часть автопарка грузовых автомобилей на сегодняшний день состоит из транспорта с низкими экологическими показателями (78 % грузовой техники не удовлетворяют нормам ЕВРО-2), можно утверждать, что научные и конструкторские работы, направленные на снижение содержания вредных веществ в отработавших газах, являются актуальными.

2. Применение комбинированной энергетической установки в грузовых автомобилях с целью улучшения экологических показателей автотранспорта – перспективно, так как снижение расхода топлива напрямую влияет на уменьшение количества выбросов в окружающую среду.

3. Из всех существующих на сегодняшний день компоновочных схем гибридной установки наиболее перспективной, с точки зрения экологичности, является компоновка комбинированной энергетической установки с электродвигателями «мотор-колесо».

### Литература

1. Сайт Internet: <http://www.autostat.ru>
2. Лавру, В.С. Источники энергии / В.С. Лавру. – М.: Наука и техника, 1997. – С. 67–145.
3. Дентон, Т. Автомобильная электроника. Самое полное описание электрических и электронных систем современных автомобилей / Т. Дентон. – М.: NT Press, 2008. – С. 354–406.
4. Абрамов, М.И. Бесступенчатые электромеханические передачи автомобилей и тракторов: учеб. пособие / М.И. Абрамов, В.Е. Андреев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 58 с.
5. Сосин, Д.А. Новейшие автомобильные электронные системы / Д.А. Сосин, В.Ф. Яковлев. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 240 с.
6. Кондакова, Н.Д. Автомобиль УРАЛ-4320 и его модификации: моногр. / Н.Д. Кондакова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010. – 176 с.
7. Сайт Internet: <http://ecoconceptcars.ru>

**Илимбетов Рафаэль Юрикович.** Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и электронные системы автомобилей и тракторов», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). Область научных интересов – гибридные силовые установки в автомобилях, электромобили. E-mail: [ilimbay@yandex.ru](mailto:ilimbay@yandex.ru)

**Астапенко Алексей Михайлович.** Аспирант кафедры «Электрооборудование и электронные системы автомобилей и тракторов», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). Область научных интересов – автомобильная электроника. E-mail: [Astapenkoam@mail.ru](mailto:Astapenkoam@mail.ru)

---

## DEVELOPMENT OF THE ASSEMBLY SCHEME COMBINED POWER PLANT FOR TRUCKS WITH IMPROVED ENVIRONMENTAL PERFORMANCE

*R.Y. Ilimbetov, A.M. Astapenko*

The paper describes the relevance of combined power plant in the design of the truck. Also, a comparison of the assembly scheme combined power plant for the development of a truck with improved environmental performance based car Ural-4320.

*Keywords: environmental contamination, hybrid system, combined power plant, motor-wheel, commercial vehicles.*

**Rafael Y. Ilimbetov.** The candidate of technical science, assistant professor of «Electrical equipment and electronic systems in cars and tractors», South Ural State University (Chelyabinsk). Field of scientific interests – hybrid cars and electric cars. E-mail: ilimbay@yandex.ru

**Alexey M. Astapenko.** The post-graduate student of «Electrical equipment and electronic systems in cars and tractors», South Ural State University (Chelyabinsk). Field of scientific interests – automotive electronics. E-mail: Astapenkoam@mail.ru

*Поступила в редакцию 21 февраля 2013 г.*