

СИЛОВОЙ АГРЕГАТ УНИВЕРСАЛЬНО-ПРОПАШНЫХ ТРАКТОРОВ ТЯГОВОГО КЛАССА 1,4 С ИНТЕГРИРОВАННЫМ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРОМ

THE POWER UNIT OF UNIVERSAL TRACTORS OF TRACTION CLASS 1,4 WITH AN INTEGRATED STARTER GENERATOR

А.Х. БЕКЕЕВ, К.Т.Н.
А.Я. АЛИЕВ, К.Т.Н.
С.А. АЛИЕВ

Дагестанский государственный аграрный университет
им. М.М. Джембулатова, Махачкала, Россия,
aliev-47@mail.ru

A.KH. BEKEEV, PhD in Engineering
A.YA. ALIEV, PhD in Engineering
S.A. ALIEV

M.M. Dzhambulatov Dagestan State Agricultural University,
Makhachkala, Russia, aliev-47@mail.ru

Техническое развитие конструкций тракторов характеризуется увеличением мощности потребителей, применением электрического привода агрегатов. В связи с этим нагрузка на электрическую систему современного трактора постоянно растет и подвергает существующие 12-вольтовые системы чрезмерной нагрузке. На сегодняшний день традиционные генераторы со сравнительно низким КПД не в состоянии удовлетворить растущие потребности тракторов и их систем. Решением задачи увеличения мощности одновременно с увеличением КПД (до 85...90 %) может послужить интегрированный стартер-генератор. Обладая достаточной мощностью в двигательном режиме (до 8 кВт), стартер-генератор позволяет улучшить пусковые и энергетические характеристики двигателей внутреннего сгорания трактора. Предлагаемая конструкция электрических машин размещается между блоком цилиндров ДВС и сцеплением трактора. Принятая компоновка позволяет передавать значительную мощность в обоих направлениях, улучшает пусковые качества дизельных двигателей тракторов, а также реализовать функции гашения крутильных колебаний коленчатого вала, что существенно снижает шум и вибрации двигателя. По результатам исследования обоснован выбор стартер-генераторного устройства на базе вентильного электродвигателя применительно к дизельным двигателям универсально-пропашных тракторов тягового класса 1,4 и разработана схема его размещения в картере сцепления без изменения его базовой конструкции. Преимущество предлагаемой конструкции заключается в использовании электрической машины для пуска двигателя, которая в этом случае включается в режим электродвигателя и в процессе работы переключается в генераторный режим, обеспечивая питание бортовой сети электрической энергией. Кроме того, объединение стартера и генератора в едином агрегате упрощает конструкцию, сокращает затраты на изготовление и сборку, что является преимуществом с точки зрения производственных издержек, заменяя стартер и генератор и – на некоторых тракторах – пусковой поршневой двигатель.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, стартер-генератор, вентильно-индукторная машина, демпфер, силовой агрегат.

The technical development of tractor designs is characterized by an increase in the power of consumers, the use of electric drive units. The load on the electric system of a modern tractor is constantly growing and exposes the existing 12-volt systems to excessive loading. To date, with the relatively low efficiency of traditional generators it is impossible to meet the growing needs of tractors and its systems. The solution of the problem of increasing the power simultaneously with increasing the efficiency (up to 85...90 %) could become an integrated starter-generator. Possessing sufficient power in the propulsion mode (up to 8 kW), the starter generator makes it possible to improve the starting and energy characteristics of the internal combustion engines of the tractor. The proposed design of electrical machines is located between the engine cylinder assembly and the tractor clutch. The adopted configuration allows to transfer considerable power in both directions, improves the starting qualities of diesel engines of tractors, and also realize the functions of damping the torsional oscillations of the crankshaft, which significantly reduces the noise and vibration of the engine. Based on the results of the study, the choice of a starter-generator device based on a valve motor is justified in connection with diesel engines of universal tractors of traction class 1,4 and a scheme for its placement in the clutch housing without changing its basic design has been developed. The advantage of the proposed design is the use of electric machines to start the engine, which in this case is switched to the electric motor mode and switches to the generator mode during operation, providing power to the on-board network. In addition, combining the starter and generator in a single unit simplifies the design, reduces the cost of manufacturing and assembly, which is an advantage in terms of production costs, replacing the starter and generator and on some tractors the starting piston engine.

Keywords: internal combustion engine, starter-generator, valve-inductor machine, damper, power unit.

Введение

В перспективе тракторы продолжают оставаться одним из основных средств производства в ряде отраслей, таких как сельское хозяйство, строительство и лесозаготовки. Поэтому совершенствование конструкций тракторов, направленное на повышение их потребительских свойств, продолжается и будет продолжаться с использованием возможностей науки и техники.

Техническое развитие тракторов характеризуется увеличением мощности двигателей внутреннего сгорания (ДВС), увеличением мощности потребителей электрической энергии и широким применением электроники. Перспективные факторы требуют совершенствования систем электроснабжения тракторов. Одним из путей совершенствования является повышение номинального напряжения источников электрической энергии.

При последовательной поддержке государства, с принятием «Стратегии развития сельскохозяйственного машиностроения России до 2020 года», удастся не только упрочить позиции отечественного тракторостроения, но и придать им дополнительный импульс для внедрения электроники и гидравлики в агрегатах и системах тракторов [1].

Одним из направлений, на котором отечественное тракторостроение может попытаться уменьшить вынужденное отставание от мирового уровня, является развитие средств автоматизации и электроприводов [2].

Регулируемые электроприводы характеризуются совершенным качеством – возможностью плавного изменения режимов работы, прежде всего частоты вращения, что достигается благодаря применению статических полупроводниковых преобразователей частоты и микропроцессорных систем управления [3].

Современные энергетические и экологические нормы требуют применения электроприводов с управляемыми электрическими машинами (ЭМ), которые имеют высокие энергетические показатели в режимах как полной, так и частичной нагрузки и при этом надежны и просты в производстве. Увеличение доли таких электроприводов является одной из самых актуальных задач электромашиностроения.

Развитие конструкций автотракторного электрооборудования и автоэлектроники должно идти в направлении применения принципиально новых комплектующих, экологиче-

ски чистых материалов, снижения затрат на их производство [4].

Нагрузка на электрическую систему современного трактора постоянно растет. Увеличивающееся потребление электрической энергии дополнительно установленным оборудованием подвергает существующие 12-вольтовые системы чрезмерной нагрузке. Современные требования по пуску вызывают необходимость использования мощных систем электропуска.

На сегодняшний день традиционные генераторы со сравнительно низким КПД не в состоянии удовлетворить растущие потребности тракторов и их систем. Решением задачи увеличения мощности одновременно с увеличением КПД (до 85...90 %) и ресурса генераторной установки, повышения экологичности и топливной экономичности тракторов, а также уменьшения массы двигателей внутреннего сгорания может послужить интегрированный стартер-генератор [5].

Поэтому одной из задач современного тракторостроения является переход на более высокие напряжения, чтобы обеспечить улучшение эксплуатационных, в том числе пусковых, качеств с возможным применением нового энергетического дополнительного оборудования.

В связи с этим перспективным является применение интегрированных систем со стартер-генераторным устройством и микропроцессорным управлением, являющихся ключевым элементом для повышения эффективности эксплуатационных показателей тракторов.

Выполнено множество работ по рассматриваемой теме:

- разработано значительное число схемных и конструктивных решений систем бортового генерирования электроэнергии и запуска ДВС;
- выполнены различные методы расчета как системных, так и динамических режимов стартер-генераторных установок в стадии генерирования электрической энергии при переменной частоте вращения вала.

За рубежом получены токоскоростные характеристики стартер-генераторных установок (СГУ) с аккумуляторными батареями на напряжение 12 и 42 В.

Однако многие вопросы в области использования СГУ в электромеханических системах запуска и генерирования бортовой энергии остаются нерешенными. В частности, остаются неисследованными комплексные системы СГУ для запуска и генерирования электрической

энергии с микропроцессорным управлением на тракторах.

В связи с изложенным возникает необходимость в проведении анализа и обобщения известных работ, дополнительных исследований СГУ для выявления пусковых и энергетических характеристик ДВС трактора, что и определяет актуальность тематики исследования.

Цель исследования

Целью работы является исследование и разработка высокоэффективных средств обеспечения надежного пуска дизельных двигателей тракторов тягового класса 1,4 и генерирования бортовой электроэнергии на основе применения стартер-генераторных установок с микропроцессорным управлением.

Материалы и методы исследования

Предлагаемая конструкция силового агрегата тракторов тягового класса 1,4 (рис. 1) содержит ДВС 1, коробку передач 2, сцепление 3, передающую приводное усилие на ведущие колеса трактора, электрическую машину 4, размещенную между блоком цилиндров двигателя и сцеплением, и датчик положения ротора 5, установленный в носовой части ДВС на коленчатом валу.

СГУ может быть использовано на тракторах тягового класса 1,4 для запуска двигателей внутреннего сгорания и генерирования электрической энергии для нужд бортовой сети, двухуровневого напряжения 12...14 В и 36...42 В.

Функциональная блок-схема СГУ приведена на рис. 2. В состав СГУ входят электрическая машина 2, силовой преобразователь энергии 3, блок управления 4, датчик положения ротора 7. Причем, силовой преобразователь и индукторный двигатель могут быть включены в общую схему жидкостного охлаждения двигателя.

Электрическая машина выполняет функции стартер-генератора, силовой преобразователь напряжения обеспечивает его работу в режимах стартера и генератора и поддерживает напряжение бортовой сети на двух уровнях – 14 и 42 В. В режиме стартера питание обеспечивает аккумуляторная батарея 6, а также энергоемкий конденсатор 5.

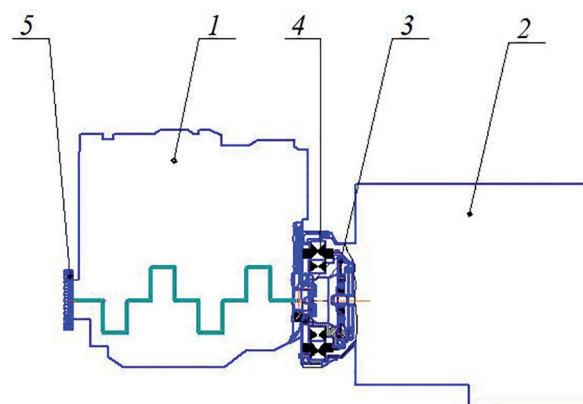


Рис 1. Схема силового агрегата трактора тягового класса 1,4:

1 – ДВС; 2 – коробка передач; 3 – сцепление; 4 – электрическая машина стартер-генераторного устройства; 5 – датчик положения ротора

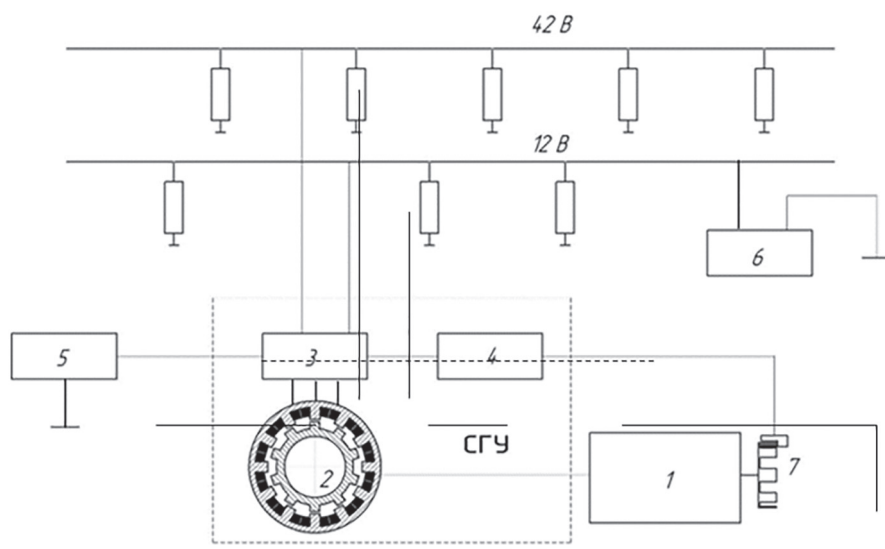


Рис. 2. Функциональная блок-схема стартер-генераторного устройства:

1 – ДВС; 2 – электрическая машина; 3 – силовой преобразователь энергии (инвертор); 4 – блок управления; 5 – энергоемкий конденсатор; 6 – аккумуляторная батарея, 7 – датчик положения ротора

На рис. 3 показана компоновка электрической машины, где электрическая машина размещена между двигателем и сцеплением трактора. Статор электрической машины 2 установлен в проставке 1, которая в свою очередь крепится к блоку цилиндров двигателя. Ротор 3 электродвигателя устанавливается на маховике 4 специальной конструкции «электрический маховик», который одновременно выполняет не только функции его раскрутки, но и маховой массы.

Принятая компоновка позволяет передавать значительную мощность в обоих направлениях и реализовать функции гашения крутильных колебаний коленчатого вала при низких скоростях вращения, что существенно снижает шум и вибрацию ДВС.

Место, выбранное для размещения стартер-генератора на ДВС, по условиям работы не самое лучшее: высокая температура, запыленность, в том числе и абразивными продуктами износа дисков сцепления. По этой причине от применения электрической машины с коллектором отказались. Для этой цели больше

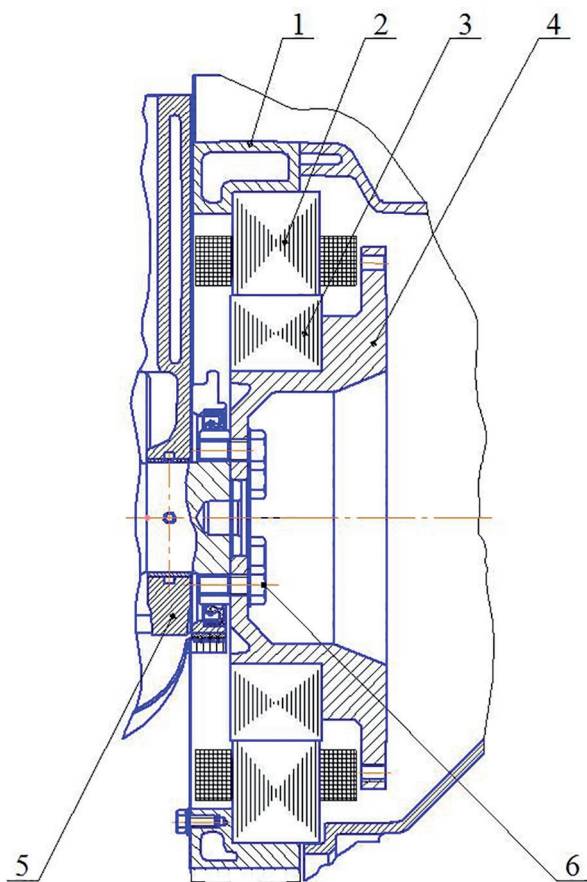


Рис. 3. Схема установки электрической машины СГУ:
1 – проставка, 2 – статор, 3 – ротор, 4 – маховик,
5 – блок цилиндров, 6 – болт

подходят вентильные машины с постоянными магнитами, но у них высокая стоимость [6–9].

Поэтому в качестве электрической машины предлагается реактивный индукторный двигатель – бесконтактная электрическая машина синхронного типа. Она имеет ряд несомненных достоинств: шихтованный зубчатый ротор без обмотки, потери в котором, как известно, минимальны; многофазную обмотку статора, выполненную в виде отдельных concentрических катушек без пересечения лобовых частей, что упрощает конструкцию, повышает технологичность производства и увеличивает ее надежность в эксплуатации.

Преимущество предлагаемой конструкции СГУ, размещенной между двигателем и сцеплением силового агрегата, заключается в возможности использования электрической машины для пуска ДВС, которая в этом случае включается в режим электродвигателя, и в процессе работы ДВС переключается на генераторный режим, обеспечивая питание электрической энергией бортовую сеть.

Кроме того, объединение стартера и генератора в одном единственном узле позволяет значительно сократить затраты на изготовление и сборку такой конструкции, что является преимуществом с точки зрения производственных издержек, заменив генератор и стартер, и на некоторых тракторах пусковой поршневой двигатель.

Для обеспечения оптимального теплового режима предлагаемой электрической машины предпочтительно использовать жидкостное охлаждение, что можно реализовать путем подключения ее к системе жидкостного охлаждения ДВС. Циркуляция происходит через кольцевую проточку детали корпус-проставка 1 статора специальной конструкции (рис. 3), изготавливаемой из алюминиевого сплава [10].

Результаты исследования и их обсуждение

При выполнении исследований были использованы отдельные материалы и результаты исследования высокоэффективных систем пуска автомобильных ДВС, накопленные Российской научно-технической школой, а также имеющийся опыт по разработке конкретных образцов таких систем, производимых рядом зарубежных фирм.

Следует отметить, что применение СГУ с микропроцессорным управлением предопределяет возможность совершенствования, наряду

с рассмотренными выше достоинствами, и других характеристик ДВС и трактора.

Во-первых, СГУ является эффективным гасителем (демпфером) крутильных колебаний вала ДВС. Функция электромагнитного демпфирования представляет перспективную альтернативу механической системе демпфирования. Важным преимуществом СГУ над механическими системами демпфирования является возможность выполнения демпфирования с дискретной частотой и переменными амплитудами, а также возможность снижения вибраций при изменении нагрузки.

Во-вторых, применение системы с СГУ обеспечивает частичную гибридизацию энергетической установки трактора (малый гибрид).

Стендовые и моторные испытания проведены в лабораториях ОАО «Авиаагрегат» (г. Махачкала).

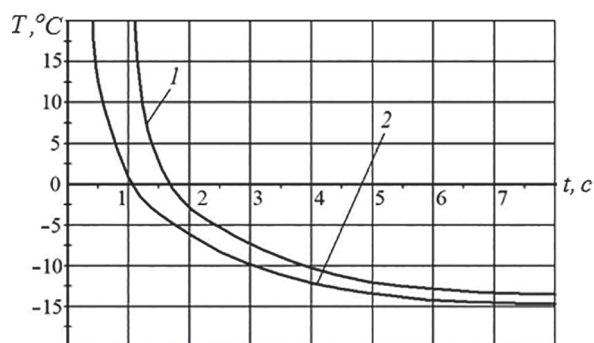


Рис. 4. Зависимость времени запуска t поршневого двигателя от температуры T окружающей среды: 1 — от электростартера; 2 — от электрической машины СГУ

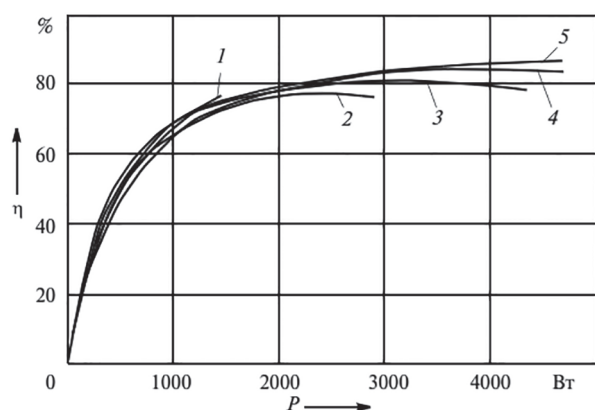


Рис. 5. Зависимость КПД starter-генераторной установки от развиваемой мощности P и частоты вращения n ротора starter-генератора: 1 — $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$; 2 — $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$; 3 — $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$; 4 — $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$; 5 — $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

По результатам проведенного исследования обоснован выбор СГУ на базе вентильного электродвигателя применительно к дизельным двигателям тракторов тягового класса 1,4 и разработана схема его размещения в карте сцепления без изменения его базовой конструкции.

Результаты предварительных испытаний этой машины показали, что при температуре 20°C СГУ за 0,5 с уверенно раскручивает ДВС до 800 мин^{-1} (рис. 4). При этом потребляемая ею мощность в режиме трогания и крутящем моменте, равном $150 \text{ Н}\cdot\text{м}$, составляет $1,8 \text{ кВт}$. В генераторном режиме СГУ с достаточно высоким КПД (рис. 5) развивает мощность до $4,5 \text{ кВт}$. То есть рассмотренный выше вариант СГУ может быть агрегатом, который успешно заменяет стартер и генератор, установленные на тракторах. Более того, выполненные авторами эксперименты показали, что СГУ, оснащенные более мощными электродвигателями, найдут применение и на других транспортных средствах, в том числе и на грузовых автомобилях.

Выводы

1. Применение совмещенной СГУ на тракторах тягового класса 1,4 позволяет улучшить пусковые характеристики дизельного двигателя, а также получить возможность работы электрооборудования при многоуровневом напряжении.

2. Предложены рекомендации по совершенствованию пусковых характеристик в условиях низких температур для дизельных двигателей на основе оптимального выбора параметров предложенной комплексной системы СГУ с микропроцессорным управлением.

3. Совмещенная СГУ с микропроцессорным управлением может дополнительно выполнять функции электромагнитного демпфера крутильных колебаний, а, учитывая частичную гибридизацию энергетической установки трактора, — функции генерирования бортовой электроэнергии многоуровневого напряжения.

Литература

1. Стратегия развития сельскохозяйственного машиностроения до 2020 года. М., 2011. 89 с.
2. Скотников В.А., Машенский А.А., Разумовский М.А. и др. Проблемы современного сельскохозяйственного тракторостроения. Минск: Высшая школа, 1983. 208 с.

3. Машинин В.В. Системы электроснабжения с повышенным номинальным напряжением для транспортных средств // Автотракторное электрооборудование. 2002. № 1. С. 12–16.
4. Коломейцев Л.Ф., Пахомин С.А., Крайнов Д.В. и др. Математическая модель для расчета электромагнитных процессов в многофазном управляемом реактивном индукторном двигателе // Известия ВУЗов. Электромеханика. 1998. № 1. С. 49–53.
5. Бунаков И.Ю. Совмещенные системы стартер-генераторов (обзор) // Молодежь и наука. Международный аграрный научный журнал. 2013. № 2. С. 23–28.
6. Бахмутов С.В., Блатушко Я.В., Маликов Я.В. и др. Анализ патентных разработок в области автотранспортных средств // Материалы Международной научно-технической конференции «Автомобиле- и тракторостроение в России». М.: МГТУ «МАМИ», 2009. С. 535–547.
7. Баулина Е.Е., Круташов А.В., Серебряков В.В. Выбор концепции автомобиля с комбинированной энергетической установкой расширенных функциональных возможностей // Известия МГТУ «МАМИ». 2017. № 3 (33). С. 2–8.
8. Деметьев Ю.В., Круташов А.В., Деев О.И. Оценка эффективности модульной комбинированной энергетической установки при выборе электродвигателей определенного диапазона мощности // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. № 3 (21). Т. 1. С. 5–12.
9. Баулина Е.Е., Круташов А.В., Серебряков В.В. Перспективы развития комбинированных энергетических установок транспортных средств // Известия МГТУ «МАМИ». 2016. № 4 (30). С. 2–14.
10. Бекеев А.Х., Астемиров Т.А., Алиев А.Я. Интегрированный стартер-генератор для энергоэффективных транспортных средств // Проблемы развития АПК региона. 2013. № 3 (15). С. 70–73.
2. Skotnikov V.A., Mashchenskiy A.A., Razumovskiy M.A. i dr. Problemy sovremennogo sel'skokhozyaystvennogo traktorostroeniya [Problems of modern agricultural tractor construction]. Minsk: Vysshaya shkola Publ., 1983. 208 p.
3. Mashinin V.V. Power supply systems with increased rated voltage for vehicles. Avtotraktornoe elektrooborudovanie. 2002. No 1, pp. 12–16 (in Russ.).
4. Kolomeytsev L.F., Pakhomin S.A., Kraynov D.V. i dr. Mathematical model for calculating electromagnetic processes in a multiphase controlled reactive inductor motor. Izvestiya VUZov. Elektromekhanika. 1998. No 1, pp. 49–53 (in Russ.).
5. Bunakov I.Yu. Combined systems of starter generators (review). Molodezh' i nauka. Mezhdunarodnyy agrarnyy nauchnyy zhurnal. 2013. No 2, pp. 23–28 (in Russ.).
6. Bakhmutov S.V., Blatushko Ya.V., Malikov Ya.V. i dr. Analysis of patent developments in the field of vehicles. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Avtomobile- i traktorostroenie v Rossii» [Materials of the International Scientific and Technical Conference «Automotive and tractor construction in Russia»]. Moscow: MGTU «MAMI» Publ., 2009, pp. 535–547 (in Russ.).
7. Baulina E.E., Krutashov A.V., Serebryakov V.V. The choice of the concept of the vehicle with the combined power plant of the expanded functionality. Izvestiya MGTU «MAMI». 2017. No 3(33), pp. 2–8 (in Russ.).
8. Dement'ev Yu.V., Krutashov A.V., Deev O.I. Estimation of the efficiency of a modular combined power plant in the selection of electric motors of a certain power range. Izvestiya MGTU «MAMI». 2014. No 3 (21). Vol. 1, pp. 5–12 (in Russ.).
9. Baulina E.E., Krutashov A.V., Serebryakov V.V. Prospects for the development of combined power plants for vehicles. Izvestiya MGTU «MAMI». 2016. No 4 (30), pp. 2–14 (in Russ.).
10. Bekeev A.Kh., Astemirov T.A., Aliev A.Ya. Integrated starter-generator for energy-efficient vehicles. Problemy razvitiya APK regiona. 2013. No 3 (15), pp. 70–73 (in Russ.).

References