УДК 631.31-83 CC BY DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42

Исследование параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом

Антон Владиславович Бижаев,
кандидат технических наук,
старший преподаватель, e-mail: a.bizhaev@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали, что снизить токсичность отработанных газов и повысить эффективность работы тракторов можно с помощью электроприводного силового агрегата для реализации тягового усилия. Коэффициент полезного действия современных электродвигателей достигает в пике 96 процентов, по сравнению с 45 у дизельного двигателя. Подчеркнули, что этот параметр для современных источников электрической энергии равен 85-90 процентам, что открывает возможности для реализации электрической тяги на тракторах. (*Цель исследования*) Представить общую концепцию электроприводного силового агрегата для трактора малого тягового класса и оценить его параметры в первом приближении. (*Материалы и методы*) Для электропривода трактора в качестве источника электрической энергии выбрали литий-ионные аккумуляторы, показывающие лучшие характеристики энергоемкости – 432-864 килоджоуля на килограмм при удельной стоимости 4200-17400 рублей на килограмм. В ходе анализа типов привода силового агрегата рассмотрели дизельный двигатель Д-120 мощностью 20 киловатт, электродвигатель постоянного тока и асинхронный двигатель с аналогичными параметрами. В качестве основы для расчета взяли трактор ВТЗ-2032 с номинальным тяговым усилием 6000 ньютонов при работе на стерне. (*Результаты и обсуждение*) Выявили лучшие показатели электропривода вследствие более широкого нагрузочного диапазона характеристик на передачах при снижении удельных затрат на киловатт-час с 24 до 15-16 рублей. (*Выводы*) Определили наиболее эффективный двигатель – электрический бесщеточный постоянного тока. Рассчитали, что удельная стоимость его энергии в 1,5-1,8 раза меньше, чем у дизельного двигателя, и составляет 15-27 рублей на киловатт-час при максимальной эффективности 95 процентов. Установили, что оптимальным решением для питания электропривода будут литий-ионные аккумуляторы. Они отличаются высокой удельной энергоемкостью – 432-864 килоджоуля на килограмм – и низкой ценой за единицу энергии, составляющей 5-45 рублей за килоджоуль.
Ключевые слова: электротрактор, электротяга, электрическая трансмиссия, электромобиль, тяговый расчет трактора, тракторный двигатель.

Для цитирования: Бижаев А.В. Исследование параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N4. С. 33-42. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42.

Research of Tractor Power Unit with Electric Drive Parameters

Anton V. Bizhaev,
Ph.D.(Eng.), senior lecturer,
e-mail: a.bizhaev@mail.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Abstract. The author showed that it was possible to reduce the exhaust gases toxicity and increase tractors efficiency using an electric power unit to implement traction. The efficiency of modern electric motors was at its peak of 96 percent, compared to 45 for a diesel engine. He emphasized that this parameter for modern sources of electrical energy was 85-90 percent, which opened up opportunities for the implementation of an electric tractor. (*Research purpose*) To present the general concept of an electric drive power unit for a tractor of a small traction class and to evaluate its parameters as a first approximation. (*Materials and methods*) For the tractor's electric drive lithium-ion batteries were chosen as a source of electrical energy, showing the best characteristics of energy intensity – 432-864 kilojoule per kilogram with a unit cost of 4200-17400 rubles per kilogram. During the analyses of the power unit drive types, a D-120 diesel engine with a power of 20 kilowatt, a DC electric motor and an asynchronous motor with similar parameters were studied. The VTZ-2032 tractor with a nominal tractive effort of 600 Newtons when working on stubble was taken as the basis for the calculation. (*Results and discussion*) The author determined the best indicators of the electric drive

by the power characteristics fullness in the gears with a decrease in unit costs per kWh from 24 to 15-16 rubles. (*Conclusions*) The most efficient engine was determined – a brushless DC electric motor. The author calculated that the specific cost of its energy was 1.5-1.8 times less than that of a diesel engine, and amounted to 15-27 rubles per kilowatt-hour with a maximum efficiency of 95 percent. It was found that lithium-ion batteries would be the optimal solution for powering the electric drive. They were distinguished by a high specific energy consumption – 432-864 kilojoule per kilogram – and a low price per energy unit, amounting to 5-45 rubles per kilojoule.
Keywords: electric tractor, electric traction, electric transmission, electric vehicle, traction calculation of a tractor, tractor engine.

For citation: Bizhaev A.V. Issledovanie parametrov traktora s elektroprivodnym silovym agregatom [Research of tractor power unit with electric drive parameters]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 33-42 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42.

Производители тракторной техники решают сразу несколько задач: повышение тягового КПД трактора, уменьшение токсичных выбросов отработанных газов двигателя в атмосферу, снижение давления на почву, а также улучшение потребительских свойств трактора, таких как цена, эргономичность, шумность, вибрация и т.д. Для тепличных хозяйств и других крытых помещений в АПК основной проблемой стали выбросы токсичных компонентов в среду помещения. Это приводит к различным заболеваниям живых организмов, а предприятие снижает темпы производства.

Существует большое количество разработок, позволяющих снизить содержание токсичных компонентов в отработанных газах: использование нейтрализаторов, совершенствование процесса сгорания топлива в двигателе, применение различных видов альтернативного топлива и т.д. [1, 2].

Текущий технологический уровень производства способствует разработке сложных электронных компонентов на микроуровне, совершенствовать автоматизированные системы управления. Данная концепция позволяет внедрить электроприводные технологии для реализации тяги трактора. Актуальной задачей остается и совершенствование тракторов с электрической тягой российского производства [3, 4].

Тракторы с электроприводом в качестве механического источника энергии для силового агрегата по современной терминологии стали называть электротракторами. Источником энергии в них может быть как аккумуляторная батарея (АКБ), так и ДВС с сочлененным генератором, то есть гибридная машина. К подобным тракторам можно отнести уже существующие, такие как *Edison model 1* на базе ХТЗ-2511 или электротрактор, созданный компанией *MOBEL* на базе модели Беларус-920. Из зарубежных фирм можно назвать *John Deere* (электротрактор *SESAM*) и *Fendt* (*e100 Vario*). Переход на электрическую тягу позволяет осуществить более гибкое управление системой, что открывает возможность для автономного управления трактором. Данное направление находится на раннем этапе развития, поэтому большого серийного производства таких тракторов не существует. Многие тракторы на электрической тяге представлены опытными образцами либо произведены мелкими сериями.

Для реализации проекта электротрактора необходимо разработать не только требования к системам этой машины, но и концепцию в целом. Поставленные задачи частично решены на базе уже созданных тракторов с электротягой. Однако эта информация не разглашается крупными заводами, а имеющаяся в открытом доступе служит только точкой опоры для дальнейших исследований по данному вопросу.

Если рассматривать возможность приобретения электротрактора для малого хозяйства, то возникает проблема с высокой удельной стоимостью трактора по отношению к его весу. Это связано в первую очередь с аккумуляторными батареями, необходимыми для обеспечения электропривода энергией. Второе место по цене занимает сама система электропривода и управляющая электроника. Например, цена трактора *Edison model 1* на базе ХТЗ-2511 составляет около 20 тыс. долл., что пока не оправдывает эффективности его использования. Поэтому актуальным остается снижение цены на подобную технику.

Несмотря высокую цену трактора, эффективность использования электропривода по энергозатратам сравнимо высокая. Известно, что КПД современных электродвигателей в пике составляет 90-96%, в зависимости от параметров. Это большое значение по сравнению с КПД дизельных двигателей, значения которых лежат обычно в области 40-45% (Красовский А.Б. 2015, Ютт В.Е. 2016). Однако даже при более низком КПД дизельного двигателя его цена тоже остается ниже, чем для электроприводных систем. Кроме прочего, силовой агрегат с ДВС в целом занимает меньше объема по сравнению с аккумуляторной системой, что накладывает дополнительные сложности размещения электроприводных систем на борту.

Для тепличных или фермерских помещений обычно используют тракторы малых тяговых классов с небольшой мощностью, которые могут использоваться на кормораздаче или прочих сельскохозяйственных операциях. Необходимо учитывать, что габариты таких тракторов малы, а это осложняет расположение в них дополнительных систем, в том числе и устройств электроприводной системы. Кроме того, механиче-

ская трансмиссия на малых машинах имеет больший КПД по сравнению с электрической. Установка электрической трансмиссии на тракторах таких габаритов и мощностей не оправдана. Электрическую трансмиссию обычно устанавливают на мобильных машинах большой мощности и габаритов, в этом случае использование механической трансмиссии не рационально ввиду более низкого КПД [5].

С учетом характеристик электродвигателей при использовании современных электронных автоматизированных систем управления нет необходимости в большом количестве передач на мобильных машинах, а в некоторых случаях и в коробке передач в принципе. Это обеспечивается благодаря широкому диапазону характеристик электроприводных систем и гибкости электронного управления.

Цель исследования – представить общую концепцию электроприводного силового агрегата для трактора малого тягового класса и оценить его параметры в первом приближении.

Для этого предстоит решить следующие задачи:

- обосновать выбор типа привода силового агрегата трактора;
- оценить характеристики источников электрической энергии для питания электроприводной системы;
- смоделировать тяговые параметры трактора с различным типом привода силового агрегата.

Материалы и методы. С целью решения проблем, возникающих в ходе анализа электротрактора, необходимо компромиссное решение, которое будет удовлетворять техническим требованиям, функциональному назначению и условиям существования на рынке. Кроме выполнения основных задач такой трактор должен иметь оптимальную характеристику взаимосвязи между эффективностью и производительностью, проблемы которой до сих пор актуальны [6].

Первоначально следует определиться со схемой компоновки силового агрегата трактора, который предположительно должен выполнять различные виды работ в помещениях с ограниченной вентиляцией. Известны различные компоновки подобных систем, начиная с расположения двигателя внутреннего сгорания в качестве источника механической энергии и заканчивая его замещением электродвигателем с сопутствующими системами. Если в силовом агрегате присутствуют несколько двигателей с различным типом потребляемой энергии, то такая машина называется гибридной.

Гибридный вариант трактора – промежуточное звено между классическим типом с ДВС и электротрактором в обиходном представлении. Его характеристики могут значительно варьироваться. Рассматри-

Таблица 1 / Table 1

Основные параметры тракторов с различными типами силовых агрегатов* / **Basic parameters of tractors with different power units types***

Параметры / Parameters	Типы тракторов / Tractor types		
	с дизельным ДВС / with diesel internal combustion engine	гибридный / hybrid	электроактор с АКБ** / electric tractor with accumulator battery
КПД / Efficiency	1	2	3
Токсичность / Toxicity	1	2	3
Цена трактора / Tractor price	3	2	1
Габариты системы / System dimensions	3	2	1
Сложность конструкции / Construction complexity	3	1	2
Рекуперация энергии / Energy recovery	1	3	3
Шумность / Noisiness	1	2	3
Вибрации / Vibrations	1	2	3
Скорость заправки/зарядки / Refueling / charging speed	3	3	1
Инфраструктура обслуживания / Service infrastructure	3	2	1
Требования к обслуживанию / Service requirements	3	2	2

*Оценку провели ранжированием: 1– негативный уровень показателя; 2 – показатель со средним значением; 3 – более благоприятное значение
* The evaluation was performed by ranking: 1 – negative level of the indicator; 2 – an indicator with an average value; 3 – a more favorable value
**АКБ – аккумуляторная батарея

вая гибридный трактор в качестве объекта исследования, можно выделить определенные преимущества и недостатки по сравнению с тракторами, имеющими дизельный двигатель или электроприводную систему (*табл. 1*) [5, 7-9].

Гибридные системы в мобильных машинах обычно используют в тех случаях, где имеет место неустановившееся движение с целью рекуперации мощности для ее последующей реализации [10]. Большую долю времени на таких режимах работают автомобили в городском цикле движения. При выполнении трактором агротехнических операций режимы частых торможений и разгонов не свойственны, и основные динамические перепады при тягово-приводных работах обеспечиваются вследствие колебаний нагрузки. Подобный гибридный трактор был создан на базе трактора ВТЗ-2048А мощностью 33 кВт в Российском государственном агроинженерном университете – Московской сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева в 2008 г. по заказу Министерства сельского хозяйства РФ. Принцип его работы заключается в быстром накоплении и отдаче энергии при колебаниях нагрузки на двигатель. В данном случае в роли накопителей энергии выступали ионисторы или суперконденсаторы, цена которых на единицу энергии гораздо выше перспективных аккумуляторных источников типа литий-ионных батарей [4, 11].

Для работы трактора в теплицах и других помещениях с ограниченной вентиляцией компенсация колебаний нагрузки считается не таким важным свойством как отсутствие токсичных выбросов. Особенность трактора с гибридным силовым агрегатом заключается в его способности работать не только в режимах компенсации энергии за счет электродвигателя и ее рекуперации, а еще и режимов, при которых обеспечивается работа трактора только лишь с помощью ДВС, либо только за счет временного обеспечения электрической тяги от аккумуляторной батареи (АКБ). Поэтому снижения токсичности отработанных газов можно добиться, перемещаясь внутри помещения только с помощью электротяги с питанием от АКБ определенной емкости, а за его пределами – на приводе от дизельного двигателя. В целях питания электропривода нужны элементы для временного хранения заряда, которые будут отвечать требованиям к функциям трактора. Элементы временного хранения заряда как источники питания для электропривода различаются по характеристикам и цене (*табл. 2*). В данном случае необходимо выбрать оптимальный вариант.

Современные литий-ионные АКБ обладают бóльшим запасом энергии, чем суперконденсаторы, и дешевле по отношению к энергоемкости. В свою очередь, ионисторы занимают промежуточное положение между аккумуляторами и конденсаторами по физическому принципу действия [12]. Литий-ионные аккумуляторы быстрее заряжаются и выдают большие токи, но для длительных режимов работ это свойство не первостепенно. Кроме того, единица энергии ионистора обходится дороже. Электролитические конденсаторы обладают большим ресурсом, широким диапазоном рабочих температур и низкой ценой за единицу веса, но сравнимо низкой энергоемкостью, что отрицательно сказывается при их выборе как источников питания для электропривода.

В качестве наиболее перспективных элементов питания, имеющих высокую энергоемкость и другие приемлемые параметры, можно рассматривать ли-

Таблица 2 / Table 2

Основные характеристики элементов временного хранения заряда
Main characteristics of temporary charge storage elements

Параметры Parameters	Электролитические конденсаторы Electrolytic capacitors	Ионисторы (суперконденсаторы) Supercapacitors	Литий-ионные АКБ (различные типы) Lithium-ion batteries (various types)
Энергоемкость, Вт·ч/кг Power consumption, W·h/kg	0,05-0,2	4 -32	120-280
Энергоемкость, кДж/кг Energy intensity, kJ/kg	0,18-0,72	14,4-115,2	432-864
Цена, руб./кДж Price, RUB/kJ	650-5000	130-2300	5-45
Цена, руб./кг Price, RUB/kg	150-3600	15 000-32 000	4200-17 400
Количество полных циклов заряда/разряда до потери 20% емкости Number of full charge / discharge cycles until 20% capacity lost	1 000 000-5 000 000	500 000-1 000 000	600-15 000
Диапазон рабочих температур, °С Operating temperature range, °C	–50…+125	–40…+75	–20…+65
Среднее время зарядки, с Average charging time, s	0,1-2,0	5-30	900-1800

тий-ионные аккумуляторы. Они способны переносить до 15000 циклов зарядки-разрядки до потери 20% емкости, а их КПД может достигать 95% [11, 13]. Рассматриваемые АКБ способны заряжаться от энергии дизельного двигателя при преобразовании генератором, затем отдавать ее при необходимости в систему электропривода. Нужно учитывать, что литий-ионные АКБ при отдаче больших токов сильно нагреваются, поэтому для поддержания рабочих характеристик им необходима система охлаждения [14].

После выбора источника хранения электрического заряда как элемента компоновки необходимо оценить тяговые и эффективные параметры трактора с электроприводом силового агрегата, а также сравнить их с базовой системой. В качестве основы для расчета этих параметров нужно исходить из характеристик двигателя. В зависимости от типа двигателя, приводящего силовую установку, параметры тяги и эффективности работы будут отличаться. В тракторном и автомобильном производстве обычно применяются 3 типа двигателей [15]:

- дизельный двигатель внутреннего сгорания (ДВС);
- электрический двигатель постоянного тока (ДПТ);
- электрический асинхронный двигатель (АД).

Для рассмотрения тяговых и экономических показателей тракторов с применением различных типов двигателей необходимо задать начальные параметры. За базу для дальнейшего расчетного исследования можно принять трактор ВТЗ-2032 (Агромаш-30ТК) с дизельным двигателем Д-120, номинальной мощностью 18 кВт, при частоте вращения $n_н$ = 1800 мин$^{-1}$. При расчете параметров, рассматривают идентичные условия эксплуатации трактора, приближенные к реальным (*табл. 3*).

Реальный трактор оборудован механической трансмиссией с 6 базовыми передачами. Для теоретического анализа можно условиться этой компоновкой с применением различных типов двигателей. В основе тягового расчета лежит общепринятая методика [16]. Исходя из взаимосвязи параметров с двигателем, можно определить мощность на крюке:

$$N_{кр} = \frac{(G_{тр}\varphi_{кр}+G_{тр}f_к)V_т}{\eta_{общ}\cdot(1-\delta)} = \frac{(P_{кр}+P_f)V_т}{\eta_{общ}\cdot(1-\delta)}, \quad (1)$$

где $N_{кр}$ – мощность на крюке, кВт;

$P_{кр}$ – усилие трактора на крюке, кН;

P_f – сила сопротивления качению колес трактора, кН;

$V_т$ – теоретическая скорость трактора, м/с;

$\eta_{общ}$ – суммарный КПД всех элементов, участвующих в образовании и передачи мощности, определяется как $\eta_{общ}= \eta_{тр}\cdot\eta_{зар}\cdot\eta_{раз}\cdot\eta_{пр}$);

δ – буксование.

Из методики тягового расчета трактора известно, что его характеристики зависят от параметров и режимов работы двигателя, которые обычно подбираются путем аппроксимации или других математических методов, описывающих реальную функцию по известным методикам для АД [17,18], ДПТ [19, 20] и ДВС [21, 22], встречающимся и в других исследованиях. В целях упрощения оценки экономической эффективности трактора был введен новый показатель $g_ц$ – удельная энергостоимость, руб./кВт·ч. Он показывает, затраты в рублях на реализацию 1 кВт мощности в течение 1 ч, и зависит от цены на топливо или электроэнергию. Этот показатель удобен для сравнения расходов на реализацию мощности трактора с двигателями, различными по типу потребляемой энергии. Для трактора с приводом силовой установки от ДВС он выражается зависимостью:

Таблица 3 Table 3

Исходные данные для тягового расчета параметров трактора
Initial data for traction calculation of tractor parameters

Параметры Parameters	Значение Value
$\varphi_{кр}$, коэффициент использования сцепного веса трактора coefficient of using the tractor coupling weight	0,4
$f_к$, коэффициент сопротивления качению колес машины coefficient of rolling resistance of the machine wheels	0,08
$r_к$, кинематический радиус колеса трактора, м kinematic radius of the tractor wheel, m	0,8
$G_{тр}$, полная масса трактора, кг total tractor weight, kg	2100
V_{min}, минимальная скорость машины, км/ч minimum vehicle speed, km/h	4
V_{max}, максимальная скорость машины, км/ч maximum vehicle speed, km/h	24
g_{en}, удельный эффективный расход топлива при номинальной мощности, г/кВт·ч specific effective fuel consumption at rated power, g/kWh	300
$i_{тр}$, количество передач трансмиссии number of transmission gears	6
$\eta_{тр}$, КПД трансмиссии transmission efficiency	0,9
$\eta_{зар}$, КПД зарядки АКБ battery charging efficiency	0,9
$\eta_{раз}$, КПД разрядки АКБ battery discharge efficiency	0,9
$\eta_{пр}$, КПД полупроводниковых силовых преобразователей efficiency of semiconductor power converters	0,85
$C_т$, условная цена на 1 литр дизельного топлива, руб./л conditional price for 1 liter of diesel fuel, rubles/l	45
$C_э$, условная тарифная ставка за 1 кВт·ч электрической энергии, руб./кВт·ч conventional tariff rate for 1 kWh of electric energy, rubles/kWh	6
Фон опорной поверхности для определения показателя буксования Support surface background for determining slip rate	Стерня Stubble

$$g_{ц} = \frac{C_т \cdot G_t}{\rho \cdot N_{кр}} = \frac{Ст \cdot g_{кр}}{\rho}, \quad (2)$$

где $g_ц$ – удельная энергостоимость, руб./кВт·ч;

G_t – часовой расход топлива, кг/ч;

ρ – плотность топлива, кг/л;

$C_т$ – цена за литр топлива, руб./л,

$g_{кр}$ – удельный эффективный расход топлива для трактора, кг/кВт·ч.

Для трактора с электроприводным силовым агрегатом и питанием от аккумулятора или другого накопителя электрической энергии удельную энергостоимость определяют другим способом:

$$g_{ц} = C_э \frac{P_e}{N_{кр}},$$

где $C_э$ – тарифная ставка за электроэнергию, руб./кВт·ч;

P_e – электрическая мощность, подведенная к электродвигателю, кВт;

N_e – механическая мощность на выходе, кВт.

Результаты и обсуждение. При рассмотрении источника энергии для электропривода в расчетах использовали параметры литий-ионных аккумуляторных батарей. Это объясняется их высокой удельной энергоемкостью – 432-864 кДж/кг, то есть больше, чем у ионисторов (в 7,5-30 раз) и у конденсаторов (в 1200-2400 раз), а также низкой ценой за единицу энергии, составляющей 5-45 руб./кДж, что меньше в 25-50 раз по сравнению с ионисторами и в 100-130 раз – с конденсаторами по средним значениям. Мощность, потребляемая электроприводом, обуславливает их вес, а также характеристику КПД при разряде. Рассмотрим тяговую характеристику трактора ВТЗ-2032 на 6-ступенчатой коробке передач, в основе которой лежит внешняя скоростная характеристика дизельного двигателя Д-120 (*рис. 1*).

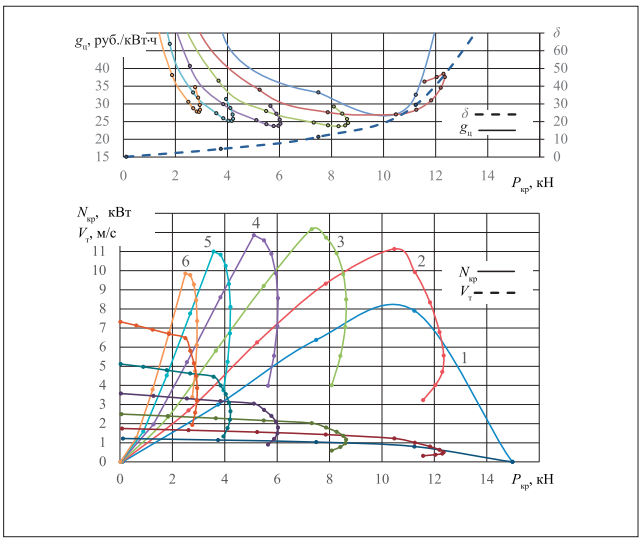

Рис. 2. Тяговые характеристики трактора ВТЗ-2032 при использовании дизельного двигателя внутреннего сгорания: $N_{кр}$ – мощность на крюке; $V_т$ – теоретическая скорость трактора; $g_ц$ – удельная энергостоимость; δ – буксование. Цифрами 1-6 обозначены порядковые номера передач

Fig. 2. VTZ-2032 tractor traction characteristics when using a diesel internal combustion engine: $N_{кр}$ – power on the hook; $V_т$ – theoretical tractor speed; $g_ц$ – specific energy consumption; δ – slipping. The numbers 1-6 indicate the serial numbers of transmission

Можно отметить области недоиспользованной тяговой мощности между кривыми для каждой передачи (*рис 2*). При этом показано, что удельный ценовой расход энергии в минимуме составляет около 24 руб./кВт·ч.

По тяговой характеристике трактора с электродвигателем постоянного тока (ДПТ) видно, что запол-

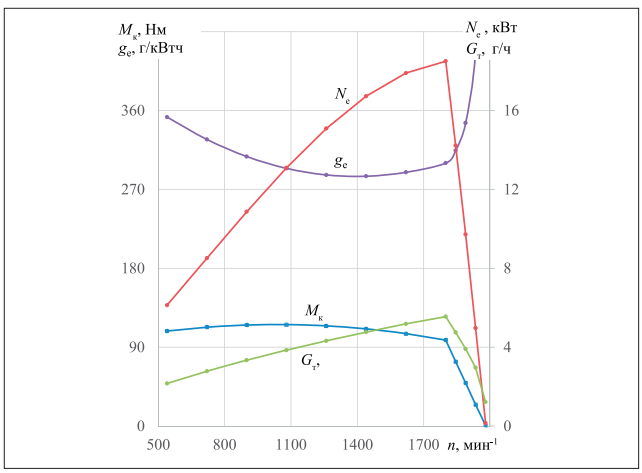

Рис. 1. Характеристики дизельного двигателя внутреннего сгорания: $M_к$ – крутящий момент; N_e – эффективная мощность; $G_т$ – часовой расход топлива; g_e – удельный эффективный расход топлива

Fig. 1. Characteristics of a diesel internal combustion engine: M_k – torque; N_e – effective power; $G_т$ – hourly fuel consumption; g_e – specific effective fuel consumption

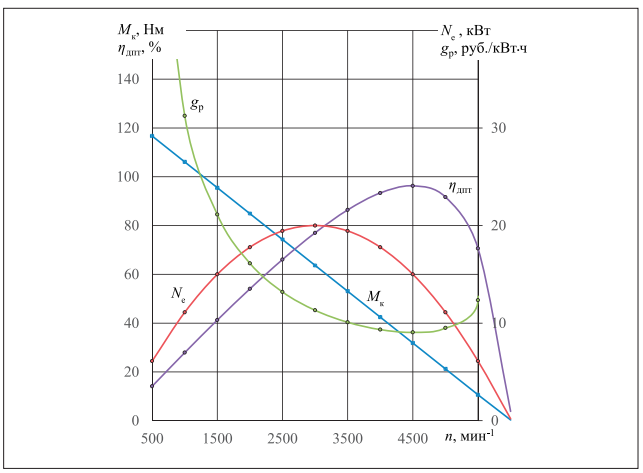

Рис. 3. Характеристики электрического двигателя постоянного тока: $M_к$ – крутящий момент; N_e – эффективная мощность; $\eta_{дпт}$ – КПД двигателя; $g_р$ – удельный ценовой расход энергии

Fig.3. DC Electric Motor Characteristics: M_k – torque; N_e – effective power; $\eta_{дпт}$ – engine efficiency; $g_р$ – specific price energy consumption

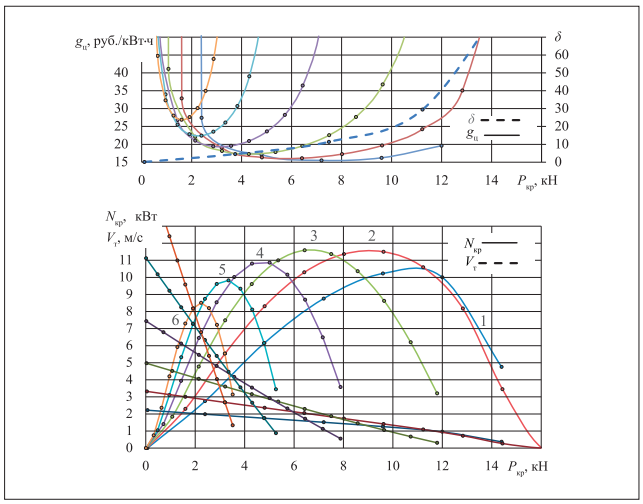

Рис. 4. Тяговые характеристики трактора ВТЗ-2032 при использовании электродвигателя постоянного тока: $N_{кр}$ – мощность на крюке; $V_т$ – теоретическая скорость трактора; $g_ц$ – удельная энергостоимость; δ – буксование. Цифрами 1-6 обозначены порядковые номера передач

Fig.4. VTZ-2032 tractor traction characteristics when using a DC electric motor: $N_{кр}$ – power on the hook; $V_т$ – theoretical tractor speed; $g_ц$ – specific energy consumption; δ – slipping. The numbers 1-6 indicate the serial numbers of transmission

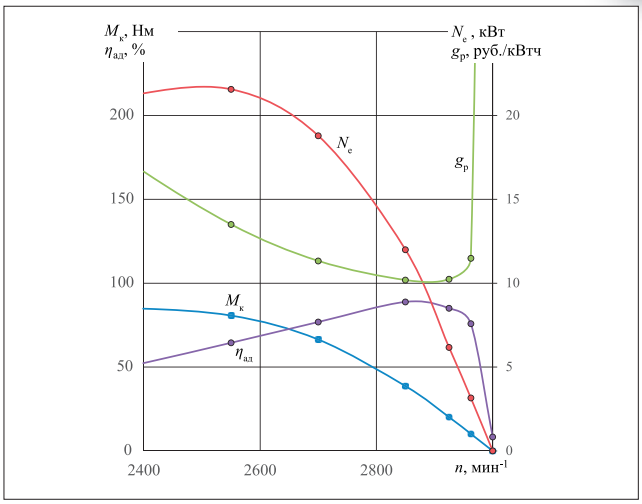

Рис. 5. Характеристики асинхронного двигателя: $M_к$ – крутящий момент; N_e – эффективная мощность; ηад – КПД двигателя; $g_р$ – удельный ценовой расход энергии

Fig. 5. Asynchronous motor characteristics: M_k – torque; N_e – effective power; $η_{ад}$ – engine efficiency; $g_р$ – specific price energy consumption

ненность зон недоиспользованной мощности будет выше, чем с использованием ДВС, причем настолько, что возможно отказаться от нескольких передач, так как их наличие теряет смысл из-за перекрытия зон характеристиками других передач (*рис. 3*).

В случае использования дизельных двигателей постоянной мощности (ДПМ), в которых запас крутящего момента составляет около 30-40%, можно добиться близких показателей. Однако негативный эффект будет заключаться в возможной длительной работе дизеля на корректорной ветви, что приведет в первую очередь к повышению выбросов сажи при эквивалентной мощности.

ДПТ обеспечивает удобный нагрузочный режим трактора, повышая крутящий момент при увеличении внешнего момента сопротивления (*рис. 4*). При этом его КПД остается в высоком диапазоне на большом интервале по частоте вращения. Минимальное значение $g_ц$ составляет 15 руб./кВт·ч, что улучшает показатель на 30-40% по сравнению с дизельным ДВС.

Механическая характеристика асинхронного двигателя при эквивалентной мощности будет отличаться от ДПТ более узким диапазоном работы (*рис. 5*). Таким образом, тяговая характеристика трактора больше схожа с используемым дизельным ДВС (*рис. 6*). Нужно учитывать, что асинхронной машиной можно управлять более гибко – путем изменения частоты тока и величины напряжения, что позволит расширить ее диапазон работы. Такое управление делает ее более универсальной, хотя и повышает трудозатраты.

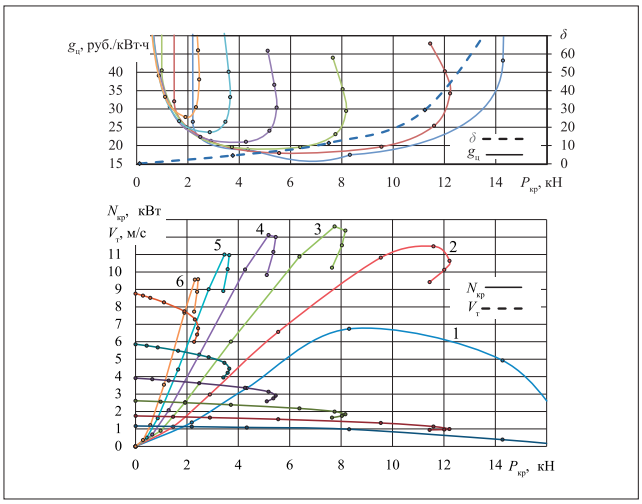

Рис. 6. Тяговые характеристики трактора ВТЗ-2032 при использовании асинхронного электродвигателя: $N_{кр}$ –мощность на крюке; $V_т$ – теоретическая скорость трактора, м/с; $g_ц$ – удельная энергостоимость; δ – буксование. Цифрами 1-6 обозначены порядковые номера передач

Fig. 6. VTZ-2032 tractor traction characteristics when using an asynchronous electric motor: $N_{кр}$ – power on the hook; $V_т$– theoretical speed of the tractor, m/s; g_{ts} – specific energy consumption; δ – slipping. The numbers 1-6 indicate the serial numbers of transmission

Минимальный удельный ценовой расход энергии $g_ц$ при использовании асинхронной машины составляет 16 руб./кВт·ч, что сопоставимо с ДПТ. Однако характеристики АД имеют более узкий диапазон, без внедрения управляющих систем.

Кроме системы частотного преобразователя для гибкого управления АД, потребуется и система управления электроприводом в целом – также, как и для

ДПТ, на которую придется основная доля затрат.

Асинхронные машины по сравнению с машинами постоянного тока имеют более низкий КПД. Это связано прежде всего с потерей энергии на образование вращающегося магнитного поля, создающего ЭДС в роторе при физическом процессе, называемого скольжением. Поэтому эффективность таких двигателей не может быть выше вследствие физического принципа работы.

Для ДПТ такой проблемы не существует, поэтому их КПД, который в пике составляет 95%, выше, чем у АД, находящийся в области 89%. Габариты при такой же мощности у АД будут в 1,5-3,0 раза больше. Затруднить выбор двигателей постоянного тока в качестве привода силовой установки трактора может также наличие коллекторно-щеточного узла, обеспечивающего статус данному двигателю контактной машины. Современный технологический уровень позволяет отказаться от коллекторно-щеточного узла ДПТ, заменив его полупроводниковыми электронными компонентами [23]. На ротор устанавливают постоянные магниты, которые приводятся в движение вращающимся магнитным полем статора, управляемого полупроводниковыми элементами [24, 25]. Такие электродвигатели называются вентильными и относятся к частному случаю синхронных машин, при этом имея характеристики, подобные ДПТ [26, 27]. Аналогичные двигатели устанавливают на некоторые электромобили, в том числе *Tesla*, в которых в качестве постоянных магнитов используется ниодимовый сплав, обеспечивающий предельную температуру работы около 250°С. Такие двигатели считаются перспективными и для трактора.

Выводы. Для дизельного двигателя удельные ценовые расходы в максимуме мощности на передачах составляют 23-29 руб./кВт·ч. При использовании ДПТ этот показатель составляет 15-27 руб./кВт·ч. Для асинхронной машины – 16 -24 руб./кВт·ч. При отклонении от пика мощности этот параметр растет при любых типах двигателей из рассматриваемых.

Моделирование тягового расчета показало преимущество электрических двигателей по характеристикам. Прежде всего это связано с заполненностью участков недоиспользованной мощности между линиями мощности соседних передач, что позволяет снизить их количество.

Выбор типа силового агрегата для трактора сводится в первую очередь к выбору двигателя. Наиболее эффективные варианты – ДПТ и асинхронный, их ценовые энергетические расходы в 1,5-1,8 раза меньше при рассматриваемых параметрах. ДПТ имеет лучшие нагрузочные характеристики, по сравнению с асинхронным электродвигателем, однако при частотном регулировании последнего можно добиться плавности изменения характеристик. Так как кроме частотной системы управления АД нужна еще и система управления электроприводом, это потребует дополнительные затраты при максимальном КПД АД около 89% по сравнению 95% у ДПТ, то более оптимальным в данном случае станет выбор ДПТ вентильного типа.

С точки зрения хранения энергии для двигателя на борту мобильной машины система из дизельного двигателя в сопряжении с генератором наиболее предпочтительна по отношению к энергоемкости и ее удельной стоимости. Поэтому, при работе тракторов малой мощности в закрытых помещениях с целью снижения токсичности ОГ, снижения шумности и вибраций, рационально только временное использование электропривода от источников электрической энергии, выбор базы которых сводится к литий-ионным АКБ. Это объясняется их высокой удельной энергоемкостью 432-864 кДж/кг, то есть больше, чем у ионисторов (в 7,5-30 раз) и у конденсаторов (в 1200-2400 раз), а также низкой ценой за единицу энергии, составляющей 5-45 руб./кДж, что ниже в 25-50 раз по сравнению с ионисторами и в 100-130 раз – с конденсаторами по средним значениям.

По общим оценкам гибридный силовой агрегат из дизельного двигателя и электродвигателя, питаемого от источника электроэнергии небольшой емкости с системой рекуперации и подзарядки от ДВС, перспективен для работы в помещениях с ограниченной вентиляцией воздуха, а также на других бытовых и сельскохозяйственных операциях, включая режимы с отсутствием продолжительных динамических изменений скорости. Этот силовой агрегат можно взять за основу для дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марков В.А., Девянин С.Н., Быковская Л.И., Маркова И.Г. и др. Биогаз – перспективное топливо для дизелей // *Грузовик*. 2018. N5. С. 29-39.

2. Бижаев А.В. Исследование методов добавок воды к топливу в поршневой двигатель внутреннего сгорания // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. Т. 9. N1. С. 16-19.

3. Загинайлов В.И., Андреев С.А. История развития, состояние и перспективы применения электромобильной техники в полеводстве // *Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2017. N6(82). С.15-22.

4. Иванов С.А., Бобровников Д.Е. Использование накопителей энергии в тягово-транспортных средствах. М.: Триада. 2018. 124 с.

5. Исаков П.П., Иванченко П.Н., Егоров А.Д. Электроме-

ханические трансмиссии гусеничных тракторов. Л.: Машиностроение. 1981. 302 с.

6. Майстренко Н.А., Уваров В.П. Потребительские ориентиры эффективного использования перспективных транспортно-технологических средств // *Вестник МГАУ имени В.П. Горячкина*. 2016. N1. С. 14-15.

7. Zeraoulia M., Benbouzid M.E.H., and Diallo D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsionsystems: A comparative study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2006. N55(6). 756-1764.

8. Burress T.A., Campbell S.L., Coomer C.L., Ayers C.W. Evaluation of the 2010 toyota prius hybrid synergy drive system. Oak ridge national laboratory. – U.S. Department of Energy Vehicle Technologies. March 2011. 79.

9. Строганов В.И., Козловский В.Н. Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой в процессах проектирования и производства: Монография. М.: МАДИ. 2014. 264 с.

10. Иванов А.М., Иванов С.А. Комбинированные энергоустановки с ИКЭ – основа эффективного использования топливно-энергетических ресурсов XXI века // *Электротехника*. 2003. N12. С. 2-6.

11. Скундин А.М. Литий-ионные аккумуляторы: современное состояние, проблемы и перспективы // *Электрохимическая энергетика*. 2011. Т. 1. С. 5-15.

12. Деспотули А., Андреева А. Суперконденсаторы для электроники (часть 1) // *Современная электроника*. 2006. N5. С. 10-14.

13. Tarascon J.-M., Armand M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. Nature. 2011. Vol. 414. 359-367.

14. Ivanov D.A., Velikoretskiy A.A., Nekrasov A.S., Papkin I.A. Lithium-ion batteries with forced air cooling: simulation and laboratory tests. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019. T. 13. N1. 5552-5558.

15. Бижаев А.В. Проблемы выбора типа привода силового агрегата трактора на электрической тяге // Чтения академика В. Н. Болтинского: Сборник статей. 2020. С. 247-252.

16. Кутьков Г.М., Соловейчик А.А., Сидоров М. В. Теория и расчет полноприводного трактора // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2014. Т. 8. N2. С. 8-14.

17. Якушев А.Я., Назирхонов Т.М., Викулов И.П., Марков К.В. Определение основных параметров асинхронного тягового электродвигателя // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2019. Т. 16. Вып. 4. С. 592-601.

18. Фаттахов К.М., Фаттахов Р.К. Расчет и построение пусковых характеристик асинхронного двигателя по каталожным данным // *Нефтегазовое дело*. 2012. N3. С. 25-31.

19. Черняк Ю.В., Гатченко В.А., Каращук С.В. Модель тягового привода электровоза постоянного тока с широтно-импульсным регулированием напряжения тяговых электродвигателей // *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт*. 2018. N1(36). С. 28-29.

20. Шухарев С.А. Моделирование работы двигателя постоянного тока // *Вестник института тяги и подвижного состава*. 2018. N14. С. 7-12.

21. Бижаев А.В., Чумаков В.Л., Путан А.А. Расчетная модель основных параметров рабочего цикла дизеля с использованием различных типов топлив // *Доклады ТСХА: Сборник статей*. 2020. Выпуск 292. Ч. I. С. 244-247.

22. Дерюшев В.В., Виноградова Т.А. Анализ скоростных характеристик современных двигателей. *Мир транспорта и технологических машин*. 2019. N1(64). С. 3-10.

23. Chau K., Chan C., and Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hy-brid vehicles. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*. 2008. 55(6). 2246-2257.

24. Al-Mashakbeh A.S.O. Proportional integral and derivative control of brushless DC motor. *European Journal of Scientific Research*. 2009. 35(2), 198-203.

25. Hanselman Duane C. Brushless permanent magnet motor design. 2nd ed. 2003. 392.

26. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. СПб.: КОРОНА-Век. 2016. 336 с.

27. Dolgih A., Martemyanov V., Borikov V. Dependence of the torque-rotor position characteristic from the tape winding current. *Przeglad elektrotechniczny*. 2019. Vol. 95. N9. 71-75.

REFERENCES

1. Markov B.A., Devyanin C.N., Bykovskaya L.I., Markova I.G. et al. Biogaz – perspektivnoe toplivo dlya dizeley [Biogas is a promising fuel for diesel engines]. *Gruzovik*. 2018. N5. 29-39 (In Russian).

2. Bizhaev A.V. Issledovanie metodov dobavok vody k toplivu v porshnevoy dvigatel' vnutrennego sgoraniya [Investigation of methods for adding water to fuel in a piston internal combustion engine]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2015. Vol. 9. N1. 16-19 (In Russian).

3. Zaginaylov V.I., Andreev S.A. Istoriya razvitiya, sostoyanie i perspektivy primeneniya elektromobil'noy tekhniki v polevodstve [The history of development, the state and prospects of the use of electromobile equipment in field cultivation]. *Vestnik federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina»*. 2017. N6(82). 15-22 (In Russian).

4. Ivanov S.A., Bobrovnikov D.E. Ispol'zovanie nakopiteley energii v tyagovo-transportnykh sredstvakh [The use of energy storage devices in traction vehicles]. Moscow: Triada. 2018. 124 (In Russian).

5. Isakov P.P., Ivanchenko P.N., Egorov A.D. Elektromekhanicheskie transmissii gusenichnykh traktorov [Electromechanical transmissions of tracked tractors]. Leningrad: Mashinostroenie. 1981. 302 (In Russian).

6. Maystrenko N.A., Uvarov V.P. Potrebitel'skie orientiry effektivnogo ispol'zovaniya perspektivnykh transportno-tekhnologicheskikh sredstv [Consumer guidelines for the effective use of promising transport and technological means]. *Vestnik MGAU imeni V.P. Goryachkina*. 2016. N1. 14-15 (In Russian).

7. Zeraoulia M., Benbouzid M.E.H., and Diallo D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsionsystems: A comparative study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2006. N55(6). 756-1764 (In English).

8. Burress T.A., Campbell S.L., Coomer C.L., Ayers C.W. Evaluation of the 2010 toyota prius hybrid synergy drive system. Oak ridge national laboratory. – U.S. Department of Energy Vehicle Technologies. March 2011. 79 (In English).

9. Stroganov V.I., Kozlovskiy V.N. Modelirovanie sistem elektromobiley i avtomobiley s kombinirovannoy silovoy ustanovkoy v protsessakh proektirovaniya i proizvodstva: Monografiya. [Modeling of systems of electric vehicles and vehicles with a combined power plant in the design and production processes: Monograph]. Moscow: MADI. 2014. 264 (In Russian).

10. Ivanov A.M., Ivanov S.A. Kombinirovannye energoustanovki s IKE – osnova effektivnogo ispol'zovaniya toplivno-energeticheskikh resursov XXI veka [Combined power plants with IKE – the basis for the effective use of fuel and energy resources of the XXI century]. *Elektrotekhnika*. 2003. N12. 2-6 (In Russian).

11. Skundin A.M. Litiy-ionnye akkumulyatory: sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy [Lithium-ion batteries: current state, problems and prospects]. *Elektrokhimicheskaya energetika*. 2011. Vol. 1. 5-15 (In Russian).

12. Despotuli A., Andreeva A. Superkondensatory dlya elektroniki (chast' 1) [Supercapacitors for electronics (part 1)]. *Sovremennaya elektronika*. 2006. N5. 10-14 (In Russian).

13. Tarascon J.-M., Armand M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. Nature. 2011. Vol. 414. 359-367 (In English).

14. Ivanov D.A., Velikoretskiy A.A., Nekrasov A.S., Papkin I.A. Lithium-ion batteries with forced air cooling: simulation and laboratory tests. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019. Vol. 13. N1. 5552-5558 (In English).

15. Bizhaev A.V. Problemy vybora tipa privoda silovogo agregata traktora na elektricheskoy tyage [Problems of choosing the tractor power unit drive type on electric traction]. Chteniya akademika V. N. Boltinskogo: Sbornik statey. 2020. 247-252 (In Russian).

16. Kut'kov G.M., Soloveychik A.A., Sidorov M. V. Teoriya i raschet polnoprivodnogo traktora [Theory and calculation of an all-wheel drive tractor]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2014. Vol. 8. N2. 8-14 (In Russian).

17. Yakushev A.Ya., Nazirkhonov T.M., Vikulov I.P., Markov K.V. Opredelenie osnovnykh parametrov asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya [Determination of the main parameters of an asynchronous traction electric motor]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*. 2019. Vol. 16. Iss. 4. 592-601 (In Russian).

18. Fattakhov K.M., Fattakhov R.K. Raschet i postroenie puskovykh kharakteristik asinkhronnogo dvigatelya po katalozhnym dannym [Calculation and construction of starting characteristics of an induction motor according to catalog data]. *Neftegazovoe delo*. 2012. N3. 25-31 (In Russian).

19. Chernyak Yu.V., Gatchenko V.A., Karashchuk S.V. Model' tyagovogo privoda elektrovoza postoyannogo toka s shirotno-impul'snym regulirovaniem napryazheniya tyagovykh elektrodvigateley [Model of a traction drive of a direct current electric locomotive with pulse-width regulation of the voltage of traction electric motors]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: Nauka i transport*. 2018. N1(36). 28-29 (In Russian).

20. Shukharev S.A. Modelirovanie raboty dvigatelya postoyannogo toka [Modeling the operation of a DC motor]. *Vestnik instituta tyagi i podvizhnogo sostava.* 2018. N14. 7-12 (In Russian).

21. Bizhaev A.V., Chumakov V.L., Putan A.A. Raschetnaya model' osnovnykh parametrov rabochego tsikla dizelya s ispol'zovaniem razlichnykh tipov topliv [Computational model of the main parameters of the diesel engine operating cycle using different types of fuels]. *Doklady TSKHA: Sbornik statey*. 2020. Iss. 292. Ch. I. 244-247 (In Russian).

22. Deryushev V.V., Vinogradova T.A. Analiz skorostnykh kharakteristik sovremennykh dvigateley [Analysis of the speed characteristics of modern engines]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2019. N1(64). 3-10 (In Russian).

23. Chau K., Chan C., and Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hy-brid vehicles. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*. 2008. 55(6). 2246-2257 (In English).

24. Al-Mashakbeh, A.S.O. (2009). Proportional integral and derivative control of brushless DC motor. *European Journal of Scientific Research*. 35(2). 198-203 (In English).

25. Hanselman Duane C. Brushless permanent magnet motor design / Duane Hanselman. 2nd ed. 2003. 392 (In English).

26. Ovchinnikov I.E. Ventil'nye elektricheskie dvigateli i privod na ikh osnove [Valve electric motors and a drive based on them]. Saint Petersburg: KORONA-Vek. 2016. 336 (In Russian).

27. Dolgih A., Martemyanov V., Borikov V. Dependence of the torque-rotor position characteristic from the tape winding current. *Przeglad elektrotechniczny*. 2019. Vol. 95. N9. 71-75 (In English).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 14.10.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 14.10.2020

Статья принята к публикации 24.11.2020
The paper was accepted
for publication on 24.11.2020