

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 631.3:629.3.032.2:629.3.01

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-53-58>

## Энергетические и экономические параметры работы трактора с электроприводом колёс

*А.В. Бижаев*<sup>1✉</sup>, *С.Н. Девянин*<sup>2</sup>, *В.Л. Чумаков*<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия<sup>1</sup> [a.bizhaev@mail.ru](mailto:a.bizhaev@mail.ru)<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-0807-1255><sup>2</sup> [s.devyanin@rgau-msha.ru](mailto:s.devyanin@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432><sup>3</sup> [valery.chumakov@gmail.com](mailto:valery.chumakov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>

**Аннотация.** Агропромышленный комплекс нуждается в тракторах с электроприводом колёс малого тягового класса, которые более перспективны на фоне растущей стоимости топлива и экологических требований. Однако возникают вопросы о перспективе использования электродвигателей в качестве привода силового агрегата трактора, энергетической оснащённости и общей подготовленности к переходу тракторов на такие системы в условиях текущего состояния энергетических ресурсов на территории РФ. С этой целью представлена методика оценки энергетических и экономических характеристик трактора с электроприводным силовым агрегатом относительно трактора с дизельным двигателем. Введенный показатель – удельная энергетическая стоимость – позволил сравнить параметры тракторов с дизельным двигателем и электроприводным силовым агрегатом. Расчёты показали, что использование вентильного электродвигателя постоянного тока по сравнению с дизелем на средних и низких нагрузках позволит снизить удельную энергетическую стоимость на 5...7 руб/кВт·ч, или на 30...50%. Расчётами установлено превышение электроэнергетического потенциала в РФ возможных энергетических затрат сельскохозяйственной техники на 300 млрд кВт·ч, что указывает на возможность перехода на электропривод силового агрегата. Однако использование электродвигателей в тракторах без дальнейшего развития энергетических комплексов и накопителей электрического заряда невозможно.

**Ключевые слова:** трактор с электроприводом колёс, электропривод силового агрегата, электродвигатель, дизельный двигатель, электроэнергетический потенциал, удельная энергетическая стоимость

**Финансирование:** Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (соглашение 075-15-2023-220).

**Для цитирования:** Бижаев А.В., Девянин С.Н., Чумаков В.Л. Энергетические и экономические параметры работы трактора с электроприводом колёс // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 53-58. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-53-58>

ORIGINAL PAPER

## Energy and economic operating parameters of tractor equipped with electrically driven wheels

*A.V. Bizhaev*<sup>1✉</sup>, *S.N. Devyanin*<sup>2</sup>, *V.L. Chumakov*<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia<sup>1</sup> [a.bizhaev@mail.ru](mailto:a.bizhaev@mail.ru)<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-0807-1255><sup>2</sup> [s.devyanin@rgau-msha.ru](mailto:s.devyanin@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432><sup>3</sup> [valery.chumakov@gmail.com](mailto:valery.chumakov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>

**Abstract:** The modern agro-industrial sector requires a large proportion of tractors of a small-traction class due to the rising fuel costs and environmental requirements. The authors raise questions about the prospects of using electric motors as a means to drive the tractor power unit and energy equipment, as well as consider pre-conditions for the integration of such systems in the tractor design under the current economic state of energy resources in the Russian Federation. For this purpose, the article presents a methodology for evaluating the energy and economic parameters of a tractor with an electrically driven power unit as compared with a tractor with a diesel engine. The offered indicator – specific energy cost – makes it possible to compare the parameters of tractors with a diesel engine and an electrically driven power unit. Calculations have shown that the use of a brushless DC electric motor compared with a diesel engine at medium and low loads will reduce the specific energy cost by 5 to 7 roubles/kWh, or by 30 to 50%. The study has established that the electric

power potential in the Russian Federation exceeds the possible energy costs of agricultural machinery by 300 billion kWh, which makes it possible to switch to electrically driven power units. However, it is impossible to use electric motors in tractors without further development of power complexes and electric charge storage batteries.

**Keywords:** tractor with electrically driven wheels, electric drive of power unit, electric motor, diesel engine, electric energy potential, specific energy cost

**Funding:** The research was funded by the University Development Programme within the framework of the Priority-2030 Strategic Academic Leadership Programme (agreement 075-15-2023-220).

**For citation:** Bizhaev A.V., Denyanin S.N., Chumakov V.L. Energy and economic operating parameters of tractor equipped with electrically driven wheels. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):53-58. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-53-58>

**Введение**

Дизельные двигатели сельскохозяйственных тракторов характеризуются токсичными выбросами отработавших газов [1, 2] и сравнительно невысоким КПД (40...50%) силовой установки на режимах максимальной эффективной мощности трактора<sup>1</sup>. Токсичные выбросы приносят ущерб здоровью человека и животных и сдерживают работу тракторов в помещениях с ограниченной вентиляцией воздуха – таких, как фермы, теплицы и т.д.

Для снижения токсичности ДВС используют разные методы: например, в цилиндры добавляют воду вместе с дизельным топливом или используют альтернативные виды топлива [3]. Проблемы снижения токсичных выбросов, повышения эффективности машины и улучшения её потребительских свойств комплексно решить весьма сложно.

Электропривод силового агрегата трактора не создает вредных выбросов в окружающую среду и имеет сравнительно высокий КПД – 80...96% [4], что позволяет использовать его в качестве источника механической энергии [5]. Гибкость управления электроприводом существенно повышает эффективность

работы трактора. Различные типы электродвигателей будут давать разный результат при их использовании в силовом агрегате, в результате мобильная машина будет иметь различные характеристики [6].

Электродвигатель по сравнению с дизельным двигателем имеет возможность рекуперации энергии при динамических изменениях состояния системы привода. Вентильный электродвигатель, не имеющий контактирующих элементов в конструкции мотора, обладающий хорошей нагрузочной характеристикой и гибким управлением при сравнительно высокой удельной мощности двигателя, предпочтительнее источников механической энергии для привода силового агрегата трактора [7].

Трактор, предназначенный для работы в ограниченно вентилируемых помещениях, должен иметь небольшие габариты и мощность двигателя в диапазоне 10...60 кВт.

Параметры двигателей различных типов необходимо сравнивать у одинаковых категорий тракторов, эксплуатируемых в идентичных условиях. Анализируя различные группы дизельных двигателей<sup>1</sup> и вентиляционных электродвигателей<sup>2</sup> [8], можно сравнить их основные параметры (табл.).

Таблица

Основные параметры дизельного и электрического двигателей для привода силового агрегата

Table

Comparison of basic parameters of diesel engines and electric motors

Параметр <i>Parameter</i>	Вид двигателя / <i>Engine type</i>	
	Дизельный двигатель <i>Diesel engines</i>	Электродвигатель <i>Electric motors</i>
Максимальный КПД, % / <i>Maximal efficiency, %</i>	40...50	80...96
Удельная мощность, кВт/кг / <i>Specific power, kW/kg</i>	0,1...0,6	2...5
Рыночная цена, тыс. руб/кВт / <i>Market price, thousand rub/kW</i>	1,5...8	3,5...15
Рабочая температура, С° / <i>Work temperature, С°</i>	80...100	-50...80
Предельная температура, С° / <i>Temperature limit, С°</i>	120...140	90...250

<sup>1</sup> Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов: Учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания». Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004.

<sup>2</sup> Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе: Курс лекций. СПб.: КОРОНА-Век, 2016.

Анализ двигателей одинаковых мощностных диапазонов выявил различия в их основных параметрах и ценовой категории. Эффективность работы вентильного электродвигателя почти в 2 раза выше, чем у дизельного двигателя, а удельная мощность – в 5...10 раз больше, что оправдывает перспективу использования вентильных двигателей в качестве привода силовых агрегатов мобильных машин.

**Цель исследований:** оценка энергоэкономических параметров и целесообразности использования трактора с электроприводным силовым агрегатом в условиях текущего состояния энергетических ресурсов на территории РФ.

### Материалы и методы

Электроэнергетический потенциал в РФ оценивался по данным из открытых источников за 2019 г., возможное предельное потребление электроэнергии сельскохозяйственной техникой определялось исследованиями [9].

Оценка энергетических характеристик трактора с электроприводным силовым агрегатом производилась относительно трактора с дизельным двигателем эквивалентной мощности 20 кВт. В качестве трактора низкого тягового класса, способного работать в теплицах или на фермах на кормораздаче, выбран прототип – трактор ВТ3-2032. Сравнивались характеристики дизельного двигателя Д-120 и бесколлекторного электродвигателя постоянного тока с неодимовыми магнитами типа НРМ20КВ. Характеристики двигателей строились по общеизвестным методикам [10, 11].

### Результаты и их обсуждение

Потребление дизельного топлива в России практически не меняется и составляет 33 млн т в год<sup>3</sup>. Доля топлива, используемого в сельском хозяйстве, составляет примерно 18...25% от общего объёма, то есть 5,9...8,3 млн т в год.

Количество энергии,  $W$ , Дж, требуемое для преобразования в механическую работу из потребляемого дизельного топлива, можно определить по формуле:

$$W = \frac{H_u \cdot G_w \cdot \eta_d \cdot \eta_e}{K_t}, \quad (1)$$

где  $H_u$  – низшая удельная теплота сгорания дизельного топлива ( $H_u \approx 42$  МДж/кг);  $G_w$  – весовое потребление топлива за год, кг;  $\eta_d$  – КПД дизельного двигателя ( $\eta_d \approx 0,4$ );  $\eta_e$  – КПД электродвигателя ( $\eta_e \approx 0,9$ );  $K_t$  – коэффициент времени для приведения в систему СИ ( $K_t = 3600$ ).

<sup>3</sup> Доживем – увидим: Пост-релиз конференции «Моторные топлива 2018». Организатор – CREON Energy в составе Группы CREON. URL: <http://rcc.ru/article/dozhivem-uvividim-63812> (дата обращения: 01.10.2023).

Количество электрической энергии, преобразованной в механическую работу дизельным топливом за год в сельскохозяйственном секторе, можно оценить в размере 24,8...34,9 млрд кВт·ч, что составляет примерно 10% от запаса производства электроэнергии. С учётом того, что до 60% работ общего объёма приходится на весенний и начало осеннего периодов, максимальная месячная доля топлива от общего годового объёма может достигать 35%. Тогда предельное месячное потребление энергии  $W_{max}$ , Дж, –

$$W_{max} = \frac{H_u \cdot G_w \cdot \tau \cdot \eta_d \cdot \eta_e}{K_t}, \quad (2)$$

где  $\tau$  – доля топлива, израсходованного в самый нагруженный месяц ( $\tau = 0,35$ ).

Ежемесячное максимальное потребление энергии сельскохозяйственной техникой может составить 8,7...12,2 млрд кВт·ч. Энергия, производимая электростанциями за 1 месяц, составила 25 млрд кВт·ч [9], что в 2...3 раза больше максимального её месячного потребления. Запас энергии позволяет осуществить переход тракторов на электропривод силового агрегата, однако использование электродвигателей в тракторах, потребляющих энергию от внешней сети, без дальнейшего развития энергетических комплексов невозможно.

Рыночная стоимость электродвигателей выше, чем стоимость дизельных, в 1,5...2 раза. Разброс стоимости в 11,5 тыс. руб/кВт объясняется различием материалов и технологий изготовления, сроков службы, производителей изделия и комплектующих и т.д. Массовое использование электродвигателей ограничивается в связи с проблемой хранения электрической энергии на борту трактора, а также низким электроэнергетическим потенциалом, составившим в 2019 г. в РФ приблизительно 1200 млрд кВт·ч [8]. При этом предельное потребление электроэнергии<sup>2</sup>, ограничиваемое электростанциями, составило около 1500 млрд кВт·ч. Условный запас энергии, который потенциально можно использовать для эксплуатации электроприводных тракторов, составил примерно 300 млрд кВт·ч.

Для оценки параметров эффективности трактора необходимо проанализировать характеристику вентильного электродвигателя в сравнении с характеристикой дизеля эквивалентной мощности. Характеристики вентильного электродвигателя и дизельного двигателя различаются, однако их можно приближённо смоделировать, исходя из физических законов и аппроксимации по эмпирическим показателям<sup>1</sup> [11]. Характеристики электродвигателей могут различаться в зависимости от их геометрических параметров [12]. За базу для моделирования характеристики

взят электродвигатель НРМ20КВ. Удобнее всего рассматривать скоростную характеристику двигателя с изменением различных показателей в зависимости от частоты вращения вала двигателя (рис. 1).

Одним из основных показателей работы двигателей являются энергозатраты на образование единицы мощности. Для ДВС эффективность оценивается удельным эффективным расходом топлива  $g_e$ , показывающим количество затрачиваемого топлива, требуемого для получения единицы мощности за единицу времени<sup>1</sup>. В электроприводе такого показателя не существует, и его эффективность обычно оценивают по КПД ( $\eta_e$ ). В отличие от мощности и крутящего момента, которые легко сравнить между собой, возникает проблема единого подхода к оценке и сравнения показателей эффективности работы двигателей различного типа. В этом случае удобным является показатель удельной энергетической стоимости ( $g_p$ , руб/кВт), характеризующий эффективность работы двигателя путём оценки удельных материальных затрат на энергию или топливо, для производства им единицы мощности. Данный показатель может отличаться при изменении цен на топливо или тарифов на электроэнергию при одних и тех же категориях двигателей, поэтому он носит прикладной характер и является удобным для сравнения эффективности их работы в конкретных условиях (рис.).

Для дизельного двигателя удельная энергетическая стоимость ( $g_p$ , руб/кВт) определяется по формуле:

$$g_p = \frac{P_D \cdot G_D}{\rho \cdot N_D}, \tag{3}$$

где  $P_D$  – цена за 1 л дизельного топлива, руб/л;  $G_D$  – часовой расход топлива, кг/ч;  $\rho$  – плотность топлива, кг/л;  $N_D$  – текущая мощность двигателя.

Для электродвигателя, питающегося от аккумулятора или другого накопителя электрической энергии, удельная энергетическая стоимость определяется другим способом:

$$g_p = T_E \frac{P_e}{N_e} \eta_B, \tag{4}$$

где  $T_E$  – тарифная ставка за электроэнергию, руб/кВт·ч;  $P_e$  – электрическая мощность, подведённая к электродвигателю, Вт;  $N_e$  – механическая мощность на выходе, Вт;  $\eta_B$  – КПД зарядки/разрядки накопителя электрической энергии и преобразователя.

Согласно данным рисунка при средних и низких нагрузках удельные затраты на дизельный двигатель выше, чем на электрический, на 6...7 руб/кВт·ч. При повышении нагрузки удельная энергетическая стоимость сближается и стремится к 15 руб/кВт·ч для обоих типов двигателей. Аналогично можно сравнивать тягово-экономические характеристики тракторов с различными типами привода силового агрегата.

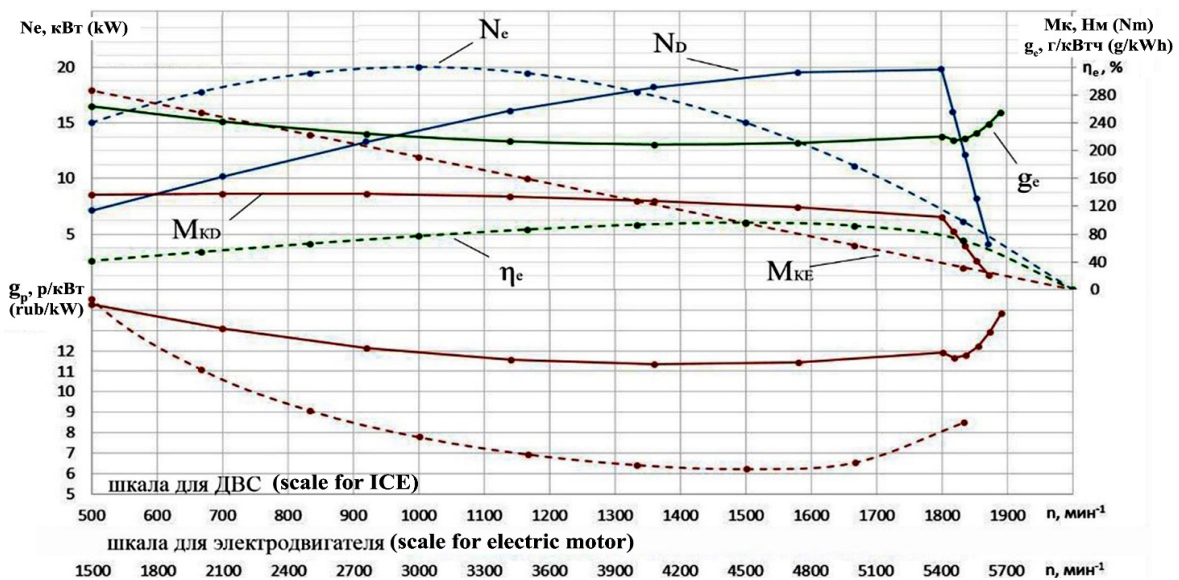


Рис. Скоростные характеристики дизельного и электрического бесщёточного двигателей:

----- характеристики электрического двигателя; ———— характеристики дизельного ДВС;  
 $N_e, N_D$  – выходные мощности дизельного и электрического двигателей соответственно;  
 $M_k$  – крутящий момент двигателей;  $g_e$  – удельный эффективный расход топлива ДВС;  
 $\eta_e$  – КПД электродвигателя;  $g_p$  – удельная энергетическая стоимость (стоимость дизельного топлива принята за 45 руб/л, электроэнергии – 6 руб/кВт·ч)

Fig. Speed characteristics of diesel engines and electric brushless motors::

----- characteristics of the electric motor, ———— characteristics of the diesel internal combustion engine;  
 $N_e, N_D$  – output power of the diesel and electric motor, respectively;  $M_k$  – torque of the electric motor and the diesel engine;  
 $g_e$  – specific effective fuel consumption of the internal combustion engine;  $\eta_e$  – efficiency of the electric motor;  $g_p$  – specific energy cost

В базовом варианте для трактора существует показатель – удельный эффективный крюковой расход топлива ( $g_{кр}$ ), по которому оценивается количество топлива, затрачиваемого для производства единицы мощности на крюке трактора за единицу времени. Для электропривода можно воспользоваться обобщающим показателем – удельной крюковой энергетической стоимостью  $g_{ркр}$ , которая учитывает стоимость производимой мощности на крюке за единицу времени:

$$g_{ркр} = \frac{g_p}{\eta_{кр}} = g_p \frac{N_e}{N_{кр}}, \quad (5)$$

где  $\eta_{кр}$  – тяговый КПД трактора;  $N_e$  – выходная мощность двигателя;  $N_{кр}$  – тяговая мощность трактора на крюке.

Предложенные показатели энергетических затрат  $g_p$  и  $g_{ркр}$  оценивают экономическую составляющую. Для решения прикладных инженерных задач при сравнении тракторов с различными типами привода силового агрегата удобнее оперировать энергетическими показателями (Дж или Вт).

Рассматривая проблему потребления электрической энергии тракторами на электрической тяге, нужно учитывать, что агропромышленный сектор не является привилегированным. Поэтому при внедрении подобных технологий в массовое использование основная доля использования электроприводных силовых агрегатов придётся на автобусы, легковые и грузовые автомобили. В таком случае запаса энергии электростанций 300 кВт·ч будет недостаточно и возникнет потребность в увеличении объёмов производимой электрической энергии.

Использование электроприводных тракторов пока не получило широкого распространения. Полагается, что проблему ограничения запаса электроэнергии можно решить, используя гибридную силовую установку, которая должна содержать в себе двигатель внутреннего сгорания и электрическую трансмиссию. Такие системы получили широкое распространение на автомобилях и подтвердили свою эффективность

#### Список литературы

1. Fenimore C.P., Jones G.W. Coagulation of soot to smoke in hydrocarbon flames. *Combustion and Flame*. 1969;13(3):303-310. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(69\)90008-X](https://doi.org/10.1016/0010-2180(69)90008-X)
2. Чумаков В.Л., Бизхаев А.В., Путан А.А. Снижение выбросов оксидов азота с отработавшими газами газодизеля // Чтения академика В.Н. Болтинского (115 лет со дня рождения): Сборник трудов конференции. М.: ООО «Мегаполис», 2019. С. 118-122. EDN: ZCFNTR
3. Devyanin S.N., Bigaev A.V., Markov V.A. Influence of Method of Adding Water to Combustible Mixture on Diesel Engine Performance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;327(2):022024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022024>
4. Bizhaev A.V., Chumakov V.L., Andreev O.P., Levshin A.G., Kabdin N.E. Application of the electric drive of the power unit

при работе. Использование комбинированных энергоустановок на тракторах не требует постоянной зарядки от внешней сети, так как можно заряжаться от преобразованной энергии двигателя. В качестве накопителей энергии можно использовать не только литий-ионные аккумуляторы, но и ионисторы (суперконденсаторы), которые в последние годы начинают активно внедряться и рассматриваться в качестве временных накопителей заряда с хорошими характеристиками<sup>4</sup> [13]. Эти факторы являются определяющими в концепции электротрактора, однако остаётся множество проблем, связанных с выбором и взаимным расположением электротехнических узлов [8], а также алгоритмов их управления. Данные задачи в настоящее время являются перспективными и решаются фирмами John Deere, Claas, Tesla, Toyota [14], Drive Electro и т.д.

#### Выводы

1. Электроэнергетический потенциал в РФ превышает возможные энергетические затраты электротракторов и другой сельскохозяйственной техники на 300 млрд кВт·ч. и указывает на возможность перехода на электропривод силового агрегата.
2. Использование электродвигателей в тракторах без дальнейшего развития энергетических комплексов и накопителей электрического заряда является невозможным.
3. Введённый показатель удельной энергетической стоимости позволил сравнить трактора с различным типом привода. Использование вентильного электродвигателя постоянного тока по сравнению с дизелем на средних и низких нагрузках позволит снизить удельную энергетическую стоимость на 5...7 руб/кВт·ч, или на 30...50%. При повышенных нагрузках удельная энергетическая стоимость сближается и стремится к 15 руб/кВт·ч для обоих типов двигателей.

<sup>4</sup> Дидманидзе О.Н., Иванов С.А., Пуляев Н.Н. Эффективность тягово-транспортных средств при использовании накопителей энергии: Монография. М.: Мегаринт, 2018. 97 с.

#### References

1. Fenimore C.P., Jones G.W. Coagulation of soot to smoke in hydrocarbon flames. *Combustion and Flame*. 1969;13(3):303-310. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(69\)90008-X](https://doi.org/10.1016/0010-2180(69)90008-X)
2. Chumakov V.L., Bizhaev A.V. Reduction of nitrogen oxide emissions with exhaust gases of gas-diesel. In: *Readings of Academician V.N. Boltinskiy: collection of conference papers*. Moscow, 2019:118-122. (In Rus.)
3. Devyanin S.N., Bigaev A.V., Markov V.A. Influence of Method of Adding Water to Combustible Mixture on Diesel Engine Performance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;327(2):022024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022024>
4. Bizhaev A.V., Chumakov V.L., Andreev O.P., Levshin A.G., Kabdin N.E. Application of the electric drive of the power unit

- of the small traction tractor. *The Challenge of Sustainability in Agricultural Systems. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;206:971-980. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-72110-7\\_107](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72110-7_107)
5. Zeraoulia M., Benbouzid M.E.H., Diallo D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2006;55(6):1756-1764. <https://doi.org/10.1109/TVT.2006.878719>
6. Chau K., Chan C., Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008;55(6):2246-2257. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918403>
7. Hanselman D.C. Brushless permanent magnet motor design. 2nd ed. 2003. 392 p.
8. Бижаев А.В. Исследование параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. № 14 (4). С. 33-42. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42>
9. Трухачёв В.И., Дидманидзе О.Н., Девянин С.Н. Какие сельскохозяйственные тракторы нужны завтра России? // Чтения академика В.Н. Болтинского: Сборник трудов конференции (Москва, 22-24 января 2020 г.). М.: ООО «Мегаполис», 2020. С. 11-19. EDN: YSXSHT
10. Дерюшев В.В., Виноградова Т.А. Анализ скоростных характеристик современных двигателей // Мир транспорта и технологических машин. 2019. № 1 (64). С. 3-10. EDN: ZAMKZF
11. Шухарев С.А. Моделирование работы двигателя постоянного тока // Вестник Института тяги и подвижного состава. 2018. № 14. С. 7-12. EDN: CZLPGJ
12. Dolgih A., Martemyanov V., Borikov V. Dependence of the torque-rotor position characteristic from the tape winding current. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*. 2019;95(9):71-75. <https://doi.org/10.15199/48.2019.09.14>
13. Bijaev A., Ishutochkina K. Assessment of the starter motor system use powered by capacitive power sources on internal combustion engine. *MATEC Web of Conferences*. 2021;341(490):00054. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134100054>
14. Burrell T.A., Campbell S.L., Coomer C.L., Ayers C.W. et al. Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory. 2011. 79 p.

#### Информация об авторах

- Антон Владиславович Бижаев**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент;  
a.bizhaev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0807-1255>
- Сергей Николаевич Девянин**<sup>2</sup>, д.т.н.,  
профессор; s.devyanin@rgau-msha.ru;  
<https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>
- Валерий Леонидович Чумаков**<sup>3</sup>, к.т.н.,  
профессор; valery.chumakov@gmail.com;  
<https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>
- <sup>1,2,3</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

#### Вклад авторов

- А.В. Бижаев – аналитика, методология, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование, визуализация  
В.Л. Чумаков – концептуализация, редактирование окончательной версии рукописи  
С.Н. Девянин – актуальность проблемы, ресурсы

#### Конфликт интересов

- Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 02.08.2023, после рецензирования и доработки 12.10.2023; принята к публикации 12.10.2023

- of the small traction tractor. *The Challenge of Sustainability in Agricultural Systems. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;206:971-980. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-72110-7\\_107](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72110-7_107)
5. Zeraoulia M., Benbouzid M.E.H., Diallo D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2006;55(6):1756-1764. <https://doi.org/10.1109/TVT.2006.878719>
6. Chau K., Chan C., Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008;55(6):2246-2257. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918403>
7. Hanselman D.C. Brushless permanent magnet motor design. 2nd ed. 2003. 392 p.
8. Bizhaev A.V. Parameters of a tractor equipped with an electrically driven power unit. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(4):33-42. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42>
9. Trukhachev V.I., Didmanidze O.N., Devyanin S.N. What agricultural tractors does Russia need tomorrow? In: *Readings of Academician V.N. Boltinskij: Collection of conference papers*. (Moscow, January 22-24, 2020). Moscow, 2020:11-19. (In Rus.)
10. Deryushev V.V., Vinogradova T.A. Analysis of speed characteristics of modern engines. *World of Transport and Technological Machines*. 2019;1(64):3-10. (In Rus.)
11. Shukharev S.A. Modeling of the operation of a DC engine. *Vestnik Instituta tyagi i Podvizhnogo Sostava*. 2018;14:7-12. (In Rus.)
12. Dolgih A., Martemyanov V., Borikov V. Dependence of the torque-rotor position characteristic from the tape winding current. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*. 2019;95(9):71-75. <https://doi.org/10.15199/48.2019.09.14>
13. Bijaev A., Ishutochkina K. Assessment of the starter motor system use powered by capacitive power sources on internal combustion engine. *MATEC Web of Conferences*. 2021;341(490):00054. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134100054>
14. Burrell T.A., Campbell S.L., Coomer C.L., Ayers C.W. et al. Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory. 2011. 79 p.

#### Author Information

- Anton V. Bizhaev**<sup>1</sup>, CSc (Eng), Professor Associate;  
<https://orcid.org/0000-0002-0807-1255>; a.bizhaev@mail.ru
- Sergey N. Denyanin**<sup>2</sup>, DSc (Eng), Professor;  
<https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>;  
s.devyanin@rgau-msha.ru
- Valery L. Chumakov**<sup>3</sup>, CSc (Eng), Professor;  
<https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>;  
valery.chumakov@gmail.com
- <sup>1,2,3</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

#### Author contribution

- A.V. Bizhaev – analytics, methodology, draft finalization and editing, visualization  
S.N. Denyanin – conceptualization, draft finalization and editing  
V.L. Chumakov – problem relevance, resources

#### Conflict of interests

- The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 02.08.2023; revised 12.10.2023; accepted 12.10.2023