

Электропривод транспортного средства сельскохозяйственного назначения

Антон Павлович Споров,
магистрант, e-mail: antonspo@yandex.ru;
Дмитрий Юрьевич Писарев,
магистрант;

Александр Сергеевич Парахнич,
аспирант

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали актуальность создания сельскохозяйственных машин с применением электропривода. (*Цель исследования*) Разработать экспериментальный образец транспортного средства с использованием электрической принципиальной схемы управления зарядом и электроприводом. (*Материалы и методы*) В качестве экспериментального образца транспортного средства с электроприводом выбрали автомобиль «ВАЗ 111 Ока», так как он имеет небольшую массу – 645 килограммов, простую конструкцию и невысокую стоимость. Рассчитали механические характеристики электродвигателя и выбрали частотный преобразователь для управления электроприводом. Провели испытания на лабораторном стенде. (*Результаты и обсуждение*) Установили аккумуляторные батареи для питания электропривода и разработали электрическую принципиальную систему заряда от стандартной сети переменного напряжения 220 вольт. Получили графики разряда источника питания, состоящего из 40 аккумуляторных батарей. (*Выводы*) Разработали электрическую принципиальную схему управления зарядом и электроприводом и реализовали ее на экспериментальном образце транспортного средства. Определили, что с током нагрузки 1 ампер аккумуляторные батареи разряжаются в течение 104 минут, с током 2 ампера – 83 минуты, 3 ампера – 65 минут, а с током 5 ампер – 50 минут, при постоянной работе электродвигателя, что достаточно для езды по ферме. Графически изобразили зависимости уровня доступной емкости от напряжения, а также разряда аккумуляторных батарей от времени при различных токах нагрузки. Провели два экспериментальных исследования по заряду аккумуляторных батарей от переменного напряжения с током 2 и 3 ампера: в первом случае время зарядки составило 350 минут, во втором – 310 минут. Выяснили, что при использовании разработанной схемы аккумуляторные батареи заряжаются равномерно.

Ключевые слова: электромобиль, электропривод, транспортное средство с электроприводом, энергетическое оборудование, асинхронный электродвигатель, аккумулятор.

■ **Для цитирования:** Споров А.П., Писарев Д.Ю., Парахнич А.С. Электропривод транспортного средства сельскохозяйственного назначения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №3. С. 48-54. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-48-54.

Electric Drive for an Agricultural Vehicle

Anton P. Sporov,
master's student, e-mail: antonspo@yandex.ru;
Dmitriy Yu. Pisarev,
master's student;

Aleksandr S. Parakhnich,
Ph.D. student (Eng.)

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The authors showed the relevance of creating agricultural machines using an electric drive. (*Research purpose*) The research objective is to develop an experimental prototype vehicle using an electrical schematic diagram of charge and electric drive control. (*Materials and methods*) The VAZ 111 Oka car was chosen as an experimental vehicle model with an electric drive, since it has a light weight of 645 kilograms, a simple design and a low cost. Mechanical characteristics of the electric motor were calculated and a frequency converter was chosen to control the electric drive. Laboratory bench tests were conducted. (*Results and discussion*) The authors installed storage batteries to power the electric drive, developed an electrical circuit schematics getting charged from a 220 volt alternating voltage network, and received graphs for the discharge of a 40-storage-battery power supply. (*Conclusions*) An electrical schematic diagram of charge and electric drive control was developed and implemented on an

experimental vehicle model. It was determined that at the electric motor continuous operation with the load current of 1 ampere, the batteries get discharged within 104 minutes; with the current load of 2 amperes, they get discharged within 83 minutes; with 3 amperes – within 65 minutes, and with 5 amperes – within 50 minutes, which is enough to drive around the farm. The authors graphically depicted the dependence of the available capacity level on the voltage, as well as the batteries' discharge on the time at various load currents. The authors carried out two experimental studies on storage batteries' charging from alternating voltage with the current of 2 and 3 amperes: in the first case, the charging time was 350 minutes, in the second – 310 minutes. It was found out that when using the developed scheme, the batteries are charged evenly.

Keywords: electromobile, electric drive, electric vehicle, power equipment, asynchronous electric motor, batteries.

For citation: Sporov A.P., Pisarev D.Yu., Parakhnich A.S. Elektroprivod transportnogo sredstva sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Electric drive for an agricultural vehicle]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 48-54 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-48-54.

Для перемещения по территории агропромышленного комплекса или фермерского хозяйства используют транспортные средства (ТС), оборудованные двигателем внутреннего сгорания (ДВС) на дизельном или бензиновом топливе [1]. ТС применяют для транспортировки грузов, перемещения персонала, а также выполнения технологических задач. Современный бензиновый и дизельный автотранспорт сильно загрязняет окружающую среду выхлопными газами с вредными примесями, а производимый шум плохо сказывается на состоянии животных [2]. Предлагается использовать ТС сельскохозяйственного назначения с электроприводом и возможностью подзарядки от сети переменного напряжения [3].

Такое ТС не загрязняет окружающую среду, что особенно важно в закрытых помещениях животноводческих комплексов. По сравнению с аналогом, где установлен ДВС, оно имеет сравнительно высокую надежность, обеспечивающую двигателю более длительный срок эксплуатации. Зарядка аккумуляторов осуществляется от стандартной электрической сети, практически от любой розетки напряжением 220 В, а также от солнечной электростанции, что позволяет значительно снизить затраты [4]. Кроме того, есть возможность экономить на ночном тарифе за потребленную электроэнергию централизованной электросети. Из недостатков следует отметить высокую стоимость аккумуляторных батарей, имеющих большой вес и объем, их длительную зарядку и утилизацию по окончании срока эксплуатации [5].

Разумеется, невозможно мгновенно весь мировой автопарк перевести на электротягу, поэтому на данный момент большую популярность приобрели так называемые «гибриды» – автомобили, приводимые в движение двумя источниками тяги: классическим ДВС и электродвигателем. Самым весомым недостатком, как у гибридов, так и у электромобилей, остаются громоздкие и тяжелые аккумуляторные батареи и небольшая дальность пробега [6].

Вследствие электрификации части автомобильного транспорта, использующего бензиновые двигатели, нагрузка на энергодобывающие объекты и электрические сети увеличивается приблизительно на 5%.

Фактически современные электромобили обладают большими запасами мощности и воплощают в себе множество технологических инноваций [7]. Массовый перевод ТС с бензиновым двигателем на электрическую тягу вполне достижим в ближайшие годы. И все же этот процесс следует осуществлять поэтапно: по мере увеличения объема выработки электроэнергии (в частности, путем использования альтернативных источников энергии) или экономии ее в ходе внедрения энергоэффективных технологий в соответствии с «Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 года» [8].

Фермеру необходимо лично вести контроль за качеством продукции, соблюдением технологических процессов, техники безопасности и пожарной безопасности на производстве. За ошибки и неточности ему приходится расплачиваться за счет собственных средств [9].

Транспортный и сельскохозяйственный секторы экономики характеризуются повышенной энергоемкостью [10]. Для транспортировки персонала, кормов или сельскохозяйственного инвентаря по территории закрытых помещений животноводческих комплексов, а также по территории фермерского хозяйства более экологичны и менее энергозатратны ТС с электроприводом.

Цель исследования – разработать экспериментальный образец транспортного средства с использованием электрической принципиальной схемы управления зарядом и электроприводом.

Материалы и методы. Для проведения экспериментальных исследований автомобиль «ВАЗ 1111 Ока» переоборудовали в ТС с электроприводом (рис. 1).

В соответствии с расчетами выбрали асинхронный двигатель АИР 100 S2 [11]:

номинальная мощность, кВт	4,0;
номинальный ток, А	8,12;
номинальная частота вращения, об/мин	2880;
$\cos \varphi_n$	0,88;
номинальный КПД	0,88;
кратность пускового момента	2,0;
кратность минимального момента	1,6;
кратность критического момента	2,2;

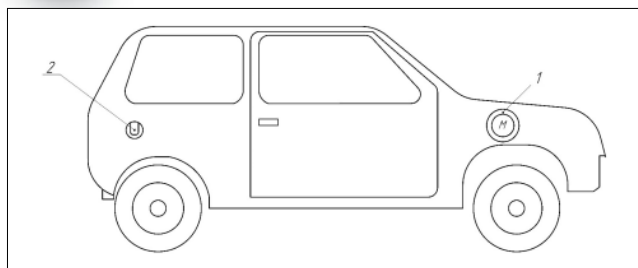


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального транспортного средства с электроприводом: 1 – асинхронный двигатель АИР 100 S2; 2 – однофазная розетка для подключения коннектора для зарядки транспортного средства

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental vehicle with an electric drive: 1 – asynchronous motor AIR100S2; 2 – single-phase socket for the vehicle charging connector

масса электродвигателя, кг 21,6.

Четырехтактный бензиновый карбюраторный двигатель для ВАЗ III имеет следующие характеристики:

номинальная мощность, кВт 21,5;
номинальная частота вращения, об/мин 5600;
номинальный КПД 0,2;
масса двигателя, кг 63,5.

При проектировании электрического привода электродвигатель выбирали таким образом, чтобы его механические характеристики соответствовали показателям штатного двигателя, отражая взаимосвязь переменных параметров в установившемся режиме.

Для оценки основных свойств электродвигателя АИР 100 S2 построили механическую характеристику по пяти характерным точкам.

Точка № 1:

$$\omega = \omega_0 = \frac{2 \pi f}{P} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость, рад/с;

f – частота тока, Гц;

P – число пар полюсов;

момент нулевой $M = 0$, Н·м.

Точка № 2:

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 2880}{30} = 301,44, \quad (2)$$

где ω_n – угловая скорость номинальная, рад/с;

n_n – обороты двигателя номинальные, об/мин;

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{4000}{301,44} = 13,27 \text{ Н·м}, \quad (3)$$

где M_n – момент номинальный, Н·м;

P_n – мощность номинальная, кВт.

Точка № 3:

$$S_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{3000 - 2880}{3000} = 0,04, \quad (4)$$

S_n – скольжение номинальное, %;

n_0 – скорость двигателя синхронная, об/мин;

n_n – скорость вращения ротора, об/мин.

Далее:

$$S_k = S_n \left(\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1} \right) = 0,04 \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,166, \quad (5)$$

где S_k – скольжение критическое, %;

μ_k – кратность критического момента;

$$\omega_k = \omega_0 (1 - S_k) = 314(1 - 0,166) = 261,87 \text{ рад/с}, \quad (6)$$

где ω_k – критическая скорость, рад/с;

ω_0 – синхронная скорость, рад/с;

$$M_k = \mu_k \cdot M_n = 2,2 \cdot 13,27 = 29,19 \text{ Н·м}, \quad (7)$$

где M_k – момент критический, Н·м;

μ_k – кратность критического момента.

Точка № 4:

$$\omega = \omega_{\min} = \frac{\omega_0}{7} = \frac{314}{7} = 44,85, \quad (8)$$

где $\omega_{\min}$ – угловая скорость минимальная, рад/с;

ω_0 – угловая скорость синхронная, рад/с;

$$M_{\min} = \mu_{\min} \cdot M_n = 1,6 \cdot 13,27 = 21,23 \text{ Н·м}, \quad (9)$$

где $M_{\min}$ – момент минимальный, Н·м;

M_n – момент номинальный, Н·м;

$\mu_{\min}$ – значение кратности минимального момента.

Точка № 5:

$\omega = 0$;

$$M_n = \mu_n \cdot M_n = 2 \cdot 13,27 = 26,54 \text{ Н·м}, \quad (10)$$

M_n – момент пусковой, Н·м;

μ_n – кратность пускового момента;

M_n – момент номинальный, Н·м.

Рассмотрим естественную механическую характеристику асинхронного электродвигателя АИР 100S2 (рис. 2).

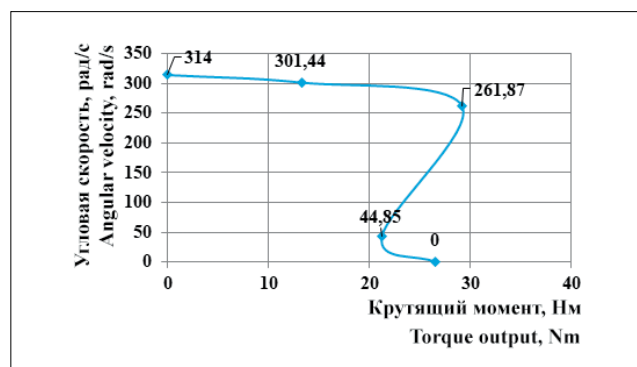


Рис. 2. Естественная механическая характеристика электродвигателя

Fig. 2. Natural mechanical characteristic curve of an electric motor

Точка № 1 соответствует режиму идеального холостого хода. На точке № 2 двигатель работает с максимальным моментом. В точке № 3 ротор двигателя будет принудительно остановлен, что для двигателя означает режим короткого замыкания. Поэтому вра-

щающий момент двигателя в этой точке называется критическим M_k . Точке №4 соответствуют минимальная угловая скорость и минимальный момент. В точке №5 двигатель работает в режиме пуска: скорость ротора $\omega = 0$, а на неподвижный ротор действует пусковой момент M_n . Участок механической характеристики, расположенный между первой и второй характерными точками, называется рабочим участком. На нем двигатель работает в установившемся режиме [12].

Для управления электродвигателем *AIP 100 S2* необходимо также выбрать частотный преобразователь, который обеспечивает плавную регулировку скорости вращения электродвигателя путем создания на выходе преобразователя необходимого электрического напряжения при заданной частоте [13]. По мощности электродвигателя наиболее подходит частотный преобразователь мощностью 7,5 кВт *Prostar PR6000-0075T3G* (рис. 3).



Рис. 3. Частотный преобразователь мощностью 7,5 кВт
Fig. 3. Frequency converter with the capacity of 7.5 kW

Технические характеристики частотного преобразователя *Prostar PR6000- 0075T3G* [14]:

мощность, кВт	7,5;
номинальный ток, А	17;
напряжение питания, В	380;
количество фаз	3;
выходная частота, Гц	0-400;
класс защиты	IP 20;
рабочая температура, °С	-10...+40;
габариты (Ш×В×Г), мм	206×286×199;
масса, кг	5,5.

Для продолжительной работы транспортного средства необходимо выбрать аккумуляторные батареи. Наиболее популярны свинцово-кислотные, так как их стоимость в 1,6 раза меньше по сравнению с аналогами и они пригодны к переработке. Для экспериментальных исследований взяли свинцово-кислотные батареи *B.B. Battery* 12 В, 5 А.ч.

Уровень входного напряжения для преобразования его в синусоиду должен находиться в пределах 480-540 В постоянного тока.

Рабочее напряжение аккумулятора (АК) составляет 11,5-13,7 В, номинальное напряжение – 12,0 В.

Рассчитаем необходимое количество аккумуляторов:

$$n = \frac{U_{AB}}{U_{AK}}, \quad (11)$$

где n – количество аккумуляторов в цепи, шт.;

U_{AB} – номинальное напряжение аккумуляторной батареи, В;

U_{AK} – номинальное напряжение одного аккумулятора, В.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Разработали электрическую принципиальную схему управления зарядом и электроприводом для внедрения ее в транспортное средство (рис. 4). Экспериментальные исследования по проверке работоспособности проводили на автомобиле «ВАЗ 1111 Ока» (рис. 5).

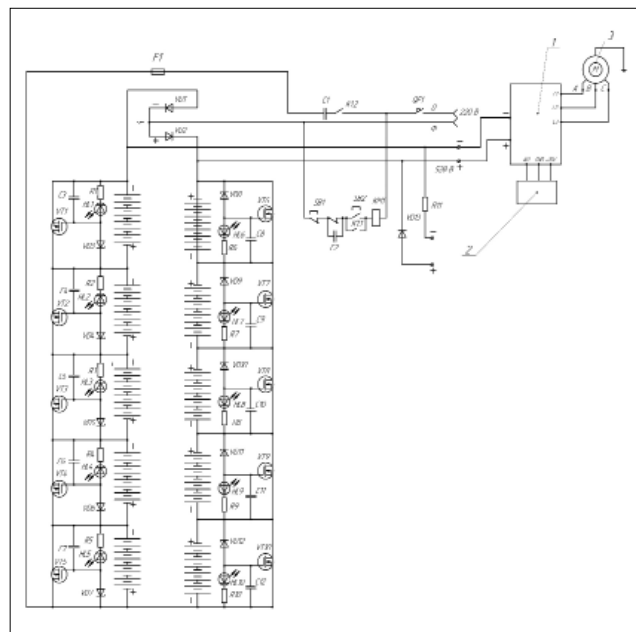


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема управления зарядом и электроприводом: 1 – частотный преобразователь *Prostar PR6000-0075T3G*; 2 – электронная педаль акселератора; 3 – асинхронный электродвигатель *AIP 100 S2*

Fig. 4. Electrical schematic diagram of charge and electric drive control: 1 – *Prostar PR6000-0075T3G* frequency converter; 2 – electronic accelerator pedal; 3 – *AIR100S2* asynchronous electric motor

Система управления зарядом АБ для электротранспорта, работающая от стандартного сетевого напряжения, обеспечивает равномерную зарядку аккумуляторов, соединенных последовательно в одну АБ. При этом аккумуляторы разделены на группы, где каждая из них имеет свое зарядное устройство.

Изучили также заряд и разряд АБ при переменном напряжении 220 В.

При различных нагрузках меняется ток нагрузки, который влияет на доступную энергию, которую мож-



Рис. 5. Аккумуляторные батареи в автомобиле «ВАЗ 1111 Ока»

Fig. 5. Storage batteries in the VAZ 1111 Oka vehicle

но взять из аккумулятора [15]. Чтобы определить, как она изменяется, провели экспериментальные исследования по разряду аккумуляторных батарей при нагрузках 10 А; 7; 5 и 2 А. В ходе исследований можно определить доступную емкость АБ при различных условиях разряда (рис. 6). Разряд АБ проводили с помощью асинхронного электродвигателя АИР 100 S2 мощностью 4 кВт [16].

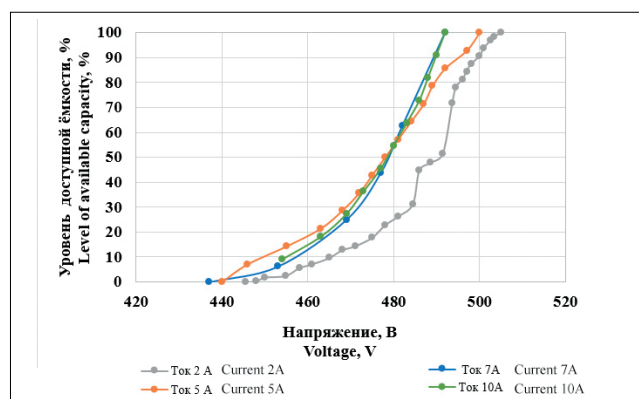


Рис. 6. Зависимость уровня доступной емкости от напряжения при различных токах нагрузки

Fig. 6. Dependence of available capacity level on voltage at various load currents

Следующим этапом было определение времени работы подключенного электродвигателя с током нагрузок 1 А; 2; 3 и 5 А (рис. 7). С током нагрузки 1 А аккумуляторные батареи разряжаются в течение 104 мин, с током 2 А – 83 мин, 3 А – 65 мин, а с током 5 А – 50 мин, при постоянной работе электродвигателя, что достаточно для езды по ферме. С помощью данных исследований можно определить доступную емкость аккумуляторных батарей при различных условиях разряда. Разряд аккумуляторных батарей проводили с помощью асинхронного электродвигателя АИР 100 S2 мощностью 4 кВт.

Результаты экспериментальных исследований по заряду аккумуляторных батарей от сетевого напряжения показали: чем меньше напряжение заряда, тем больше времени требуется на его увеличение (рис. 8).

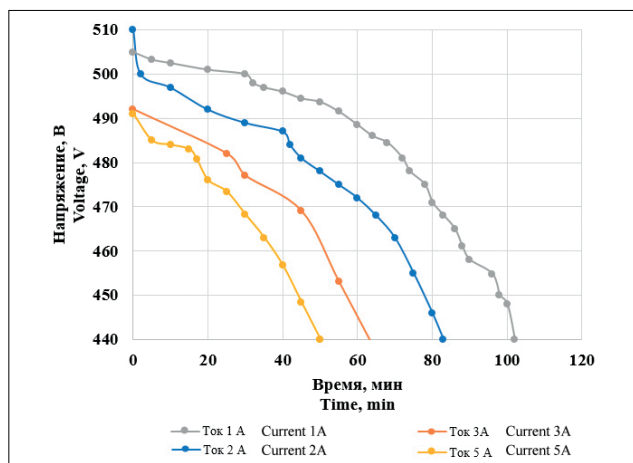


Рис. 7. Зависимость разряда аккумуляторных батарей от времени при различных токах нагрузки

Fig. 7. Battery discharge graph depending on time at different load currents

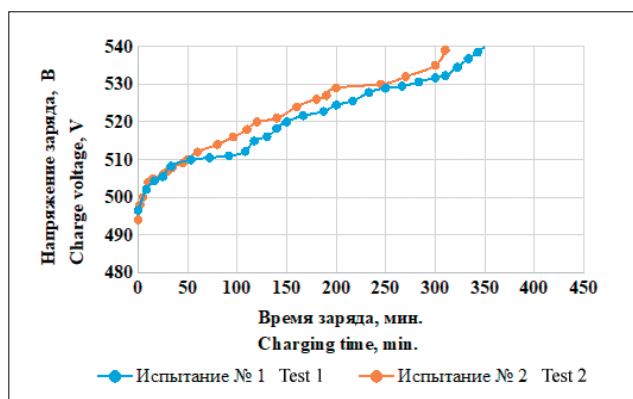


Рис. 8. Зависимость напряжения заряда от времени заряда

Fig. 8. The graph of charge voltage variation dependence on the charging time

Кроме того, провели два экспериментальных исследования по заряду аккумуляторных батарей от переменного напряжения с током заряда 2 и 3 А. В первом случае время зарядки составило 350 мин, во втором – 310 мин.

Все АБ разряжаются и заряжаются равномерно.

Выводы. Разработали электрическую принципиальную схему управления зарядом и электроприводом и реализовали ее на экспериментальном образце транспортного средства.

Определили, что с током нагрузки 1 А аккумуляторные батареи разряжаются в течение 104 мин, с током 2 А – 83 мин, 3 А – 65 мин, а с током 5 А – 50 мин, при постоянной работе электродвигателя, что достаточно для езды по ферме.

Графически изобразили зависимости уровня доступной емкости от напряжения, а также разряда аккумуляторных батарей от времени при различных токах нагрузки.

Провели два экспериментальных исследования по заряду аккумуляторных батарей от переменного



напряжения с током заряда 2 и 3 А. В первом случае время зарядки составило 350 мин, во втором – 310 мин.

Выяснили, что при использовании разработанной схемы аккумуляторные батареи заряжаются равномерно.

Исследования выполнены при поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы «УМНИК» – 430ГУЦЭС8-D3/62163.

The research was carried out with the support of the Innovation Promotion Fund within the UMNIK program – 430ГУЦЭС8-D3/62163.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Friedrischkova K., Vala D. Development of the Methodology for the Management of the Electromobile System and the Family House System. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. 2018. Vol. 10808.
2. Семин А.Н., Иовлев Г.А. К вопросу о создании нормативов для формирования оптимального состава машинно-тракторного парка // *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*. 2019. N7. С. 8-12.
3. Габитов И.И., Мударисов С.Г., Иофинов П.А. Региональные меры государственной поддержки повышения уровня технической оснащенности машинотракторного парка предприятий АПК // *Технический сервис машин*. 2020. N2(139). С. 83-95.
4. Трескова Ю. В. Электромобили и экология. Перспективы использования электромобилей // *Молодой ученый*. 2016. N12. С. 563-565.
5. Kim S.Y., Cho J.H., Murray E. Stochastic electrotransport selectively enhances the transport of highly electromobile molecules. 2015. 10.
6. Гаджилы Б.Э. Исследование аккумуляторных батарей электромобилей // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура (электронный научный журнал)*. 2014. N2(2). М.: МАДИ. 2014.
7. Huang X., Lin Y., Lim Ming K., et al. The influence of knowledge management on adoption intention of electric vehicles: perspective on technological knowledge. *Industrial management and data systems*. 2021. April.
8. Александров И.К., Раков В.А., Щербакова А.А. Перспективы развития транспортных средств с электроприводом // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2011. N4. С. 65-68.
9. Гусаров В.А., Юферев Л.Ю., Рощин О.А., Споров А.П.

Модернизация автомобиля «Ока» в электромобиль «Ока-Э» для нужд фермера по организации и контролю технологических процессов // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020. N3(40). С. 37-44.

10. Riedner L., Mair C., Zimek M., et al. E-mobility in agriculture: differences in perception between experienced and non-experienced electric vehicle users. *Clean technologies and environmental policy*. 2019. Vol. 21. N1. 55-67.

11. Кабдин Н.Е., Сетевой электронный учебно-методический комплекс «Основы электропривода» // *Хроники объединенного фонда электронных ресурсов. Наука и образование*. 2014. N6(61). С. 27.

12. Баширин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат. 1982. 392с.

13. Kougiass I., Nikitas A., Thiel C. Clean energy and transport pathways for islands: A stakeholder analysis using Q method. *Transportation research part d-transport and environment*. 2020. 78. 1021802020.

14. Бузун С.А., Лебедев К.Н. Адаптивный плавный пуск погружных электронасосных агрегатов // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2008. N8. С. 6-7.

15. Гречушников Е.А., Прокофьев Д.В., Салюк Е.В., Набатчиков А.В. Испытания свинцовых аккумуляторных батарей в условиях контрольно-испытательных станций // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2020. N71. С. 188-195.

16. Волокитина Е.В., Ерохин Д.В., Москвин Е.В., Вшивцев М.Н. Испытательный комплекс для высокоскоростного электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2013. N3. С. 40-43.

REFERENCES

1. Friedrischkova K., Vala D. Development of the Methodology for the Management of the Electromobile System and the Family House System. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. 2018. Vol. 10808 (In English).
2. Semin A.N., Iovlev G.A. K voprosu o sozdanii normativov dlya formirovaniya optimal'nogo sostava mashinno-traktornogo parka [On the issue of creating standards for the formation of the optimal composition of the machine-tractor park]. *Ekonomika sel'skokhozyaystvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatiy*. 2019. N7. 8-12 (In Russian).
3. Gabitov I.I., Mudarisov S.G., Iofinov P.A. Regional'nye mery

gosudarstvennoy podderzhki povysheniya urovnya tekhnicheskoy osnashchennosti predpriyatiy agropromyshlennogo kompleksa [Regional measures of state support for increasing the technical equipment of machine and tractor fleet of agricultural enterprises]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2020. Vol. 58. N2(139). 83-95 (In Russian).

4. Treskova Yu.V. Elektromobili i ekologiya. Perspektivy ispol'zovaniya elektromobiley [Electric vehicles and ecology. Prospects of electric vehicles]. *Molodoy uchenyy*. 2016. N12. 563-565 (In Russian).

5. Kim S.Y., Cho J.H., Murray E. Stochastic electrotransport selectively enhances the transport of highly electromobile mol-

ecules. 2015. 10 (In English).

6. Gadzhily B.E. Issledovanie akkumulyatornykh batarey elektromobiley [The study of the batteries of electric vehicles]. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura (elektronnyy nauchnyy zhurnal)*. Moscow: MADI. 2014. N2(2) (In Russian).

7. Huang X., Lin Y., Lim Ming K., et al. The influence of knowledge management on adoption intention of electric vehicles: perspective on technological knowledge. *Industrial management and data systems*. 2021. April (In English).

8. Aleksandrov I.K., Rakov V.A., Shcherbakova A.A. Perspektivy razvitiya transportnykh sredstv s elektropivodom [Prospects of development of vehicles with the electric drive]. *Transport na al'ternativnom toplive*. 2011. N4. 65-68 (In Russian).

9. Gusarov V.A., Yuferev L.Yu., Roshchin O.A., Sporov A.P. Modernizatsiya avtomobilya «Oka» v elektromobil' «Oka-E» dlya nuzhd fermerov po organizatsii i kontrolyu tekhnologicheskikh protsessov [Modernization of «Oka» Vehicle into «Oka-E» Electric Vehicle for Needs of Farmer on Organization and Control of Technological Processes]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2020. N3(40). 37-44 (In Russian).

10. Riedner L., Mair C., Zimek M., et al. E-mobility in agriculture: differences in perception between experienced and non-experienced electric vehicle users. *Clean technologies and environmental policy*. 2019. Vol. 21. N1. 55-67 (In English).

11. Kabdin N.E., Setevoy elektronnyy uchebno-metodicheskiy kompleks «Osnovy elektropivoda» [Network-based elec-

tronic learning and methodological complex "Fundamentals of electric drive"]. *Khroniki obedinennogo fonda elektronnykh resursov. Nauka i obrazovanie*. 2014. N6 (61). 27 (In Russian).

12. Bashirin A.V., Novikov V.A., Sokolovskiy G.G. Upravlenie elektropivodami [Electric drive control]. Leningrad: Energoizdat. 1982. 392 (In Russian).

13. Kougias I., Nikitas A., Thiel C. Clean energy and transport pathways for islands: A stakeholder analysis using Q method. *Transportation research part d-transport and environment*. 2020. 78. 1021802020 (In English).

14. Buzun S.A., Lebedev K.N. Adaptivnyy plavnyy pusk pogruzhnykh elektronasosnykh agregatov [Adaptive soft starters for submersible electric pumping units]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2008. N8. 6-7 (In Russian)

15. Grechushnikov E.A., Prokof'ev D.V., Salyuk E.V., Nabat-chikov A.V. Ispytaniya svintsovykh akkumulyatornykh batarey v usloviyakh kontrol'no-ispytatel'nykh stantsiy [Test lead storage batteries in the conditions of control and test stations]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2020. N71. 188-195 (In Russian).

16. Volokitina E.V., Erokhin D.V., Moskvina E.V., Vshivtsev M.N. Ispytatel'nyy kompleks dlya vysokoskorostnogo elektropivoda kompressora sistemy konditsionirovaniya vozdukh [Test system for the high-speed electric drive of an air conditioning compressor]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*. 2013. N3. 40-43 (In Russian).

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Споров А.П. – проведение лабораторных исследований, разработка теоретических предпосылок, обработка результатов исследований, доработка текста, формирование общих выводов.

Писарев Д.Ю. – помощь в сборке электрических схем, литературный анализ.

Парахнич А.С. – построение графиков, мониторинг лабораторных исследований, редактирование и оформление материалов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Sporov A.P. – conducting laboratory research, developing theoretical prerequisites, processing research results, finalizing the text, forming general conclusions.

Pisarev D.Yu. – assistance in assembling electrical circuits, literary analysis.

Parakhnich A.S. – plotting graphs, monitoring laboratory research, editing and formatting materials.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

20.05.2021

06.09.2021