

АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЕЙ В ТРАКТОРАХ

© Раков В.А.,
Литвинов В.И.



Вячеслав Александрович Раков

Вологодский государственный университет
Российская Федерация, 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15
E-mail: vyacheslav.rakov@mail.ru
ORCID: 0000-0003-4725-5839; ResearcherID: M-9939-2016



Владимир Игоревич Литвинов

Вологодская государственная молочнохозяйственная
академия имени Н.В. Верещагина
Российская Федерация, 160555, г. Вологда,
с. Молочное, ул. Емельянова, д. 1
E-mail: lit.vinov@mail.ru

Один из способов увеличить эффективность применения тракторов – повышение экономических параметров энергоустановки. Этого можно достичь при помощи использования электричества в энергоустановке, т. е. либо комбинированных, либо полностью электрических энергоустановок. При этом подобные энергоустановки оказываются наиболее дорогими и имеют короткий резерв аккумулятора. С учетом неоднозначности вопроса и большой заинтересованности сельскохозяйственных предприятий в статье осуществлен анализ вероятных расходов во время использования тракторов МТЗ-82 с дизельным двигателем, комбинированной и полностью электрической силовой установкой. Оценка построена на данных, полученных с помощью сравнения опытных машин с эксплуатируемыми. При анализе учтены начальная цена машины на базе трактора МТЗ-82, потребление топлива (электроэнергии), указанное время использования, наличие дополнительных расходов на зарядку от внешней электросети, издержки на техобслуживание и ремонт каждого трактора, принимая во внимание его особенности, капиталовложения на капремонт. Общие затраты за десять лет использования каждого трактора посчитаны путем суммирования всех вышеперечисленных затрат. При этом стоимость одного литра дизельного топлива – 46 руб., стоимость одного кВт*ч электроэнергии – 6 руб.; ресурс LiFePO₄ аккумуляторов – 2000 циклов разряда-заряда. По итогам анализа затраты при эксплуатации машин оказались следующими: дизельный двигатель МТЗ-82 – 0,55 тыс. руб. / час; гибридная энергоустановка последовательной/параллельной схемы – 0,6/0,56 тыс. руб. / час; электрическая энергоустановка – 0,36 тыс. руб. / час. Выявлено, что при данных условиях эксплуатации переход на гибридные электрические энергоустановки в тракторе МТЗ-82 экономически неэффек-

тивен. Работа на полностью электрической энергоустановке позволит сократить расходы в 1,5 раза.

Трактор, комбинированные энергетические установки, расход топлива, эффективность, оценка, электрический привод, затраты.

При возделывании культур растениеводства и обслуживании животноводческих ферм самые значительные расходы приходятся на обеспечение работы машинно-тракторного парка [1–3].

Цель исследования

Непрерывный рост производительности труда и высокая конкуренция обязывают находить способы снижения затрат. Если говорить о совершенствовании устройства тракторов, то такими способами будут являться увеличение КПД двигателя внутреннего сгорания, изменение конструкции рабочего органа, повышение производительности коробки перемены передач, уменьшение стоимости топлива, используемого для сельскохозяйственной техники, снижение стоимости непосредственно самих тракторов.

Материалы, методы и объект исследования

В настоящее время увеличение коэффициента полезного действия дизельных двигателей производится благодаря применению наддува впускного воздуха, повышению качества распыла топлива форсункой, использованию смазок с лучшими антифрикционными свойствами. Дальнейшее повышение КПД требует кардинального изменения конструкции энергетической установки [3–5].

Коробка перемены передач тракторов в совокупности с дизельным двигателем требует широкого диапазона изменяемых передаточных отношений, а также возможности специальных режимов работы при высоком передаваемом крутящем моменте. В итоге она сложна, громоздка, при

ее обслуживании и ремонте нужны большие капиталовложения.

Кроме этого, большинство производителей техники, НИИ в области агроинженерии могут предложить тракторы с гибридной энергетической установкой (КЭУ) либо полностью электрическим двигателем. Такое решение в автомобилестроении уже не редкость, однако в сельском хозяйстве большой популярности пока не получило. Из-за очень высоких цен на горючесмазочные материалы у руководителей региональных сельскохозяйственных предприятий все чаще возникают вопросы о возможности перехода машинно-тракторного парка на электрическую энергию.

В связи с этим авторы предлагают выполнить исследование эффективности применения тракторов с гибридной и полностью электрической энергетическими установками [6–9].

Трактор с КЭУ в сравнении с классической дизельной энергетической установкой имеет следующие преимущества:

- высокий крутящий момент на выходном валу при выходе машины в рабочий режим;
- облегчение сложной многоступенчатой коробки передач, как итог – снижение нагрузки на оператора, управляющего ей;
- возможность оптимизации и стабилизации нагрузочных режимов энергетической установки;
- уменьшение расходов топлива и смазочных материалов при определенных режимах работы;
- переход на более дешевую электрическую энергию;
- снижение расходов на запасные части и комплектующие;

– уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, что очень важно при работе в ангарах, на животноводческих фермах и т. д.

Обоснование исходных данных по трактору МТЗ-82

Мы предлагаем применить сравнительную оценку результатов расчета затрат при эксплуатации тракторов с различными типами энергетических установок в течение заданного периода времени (10 лет). В роли ключевой машины выступает трактор МТЗ-82 с дизельным двигателем. Соотношение затрат стоимости машин и их элементов принято при сопоставлении серийных автомобилей с различными типами энергетических установок [10–13].

Цена нового трактора МТЗ-82 – примерно 1,5 млн руб. (без навесного оборудования). Расход топлива при выполнении транспортных работ составляет в среднем около 6 литров дизельного топлива в час. При стоимости дизельного топлива 46 руб. за литр это примерно 0,276 тыс. руб.

Для сравнения нами взят период использования 10 лет. За этот промежуток времени с учетом продолжительности рабочего дня (8 часов) и количества рабочих дней в месяц (20) общая наработка составит 19200 часов. Резерв двигателя МТЗ-82 до капитального ремонта – 8000 моточасов, ресурс топливной аппаратуры – 6000 моточасов. Стоимость ремонта топливной аппаратуры и других систем двигателя принята на основании усредненных данных ремонтных мастерских.

Стоимость ремонта основных узлов указана ниже:

– ремонт топливной аппаратуры – 60 тыс. руб. (6000 моточасов);

– замена сцепления – 40 тыс. руб. (9000 моточасов);

– ремонт тормозной системы – 15 тыс. руб. (10000 моточасов);

– ремонт КПП – 40 тыс. руб. (10000 моточасов);

– капитальный ремонт двигателя (без учета топливной аппаратуры) – 120 тыс. руб. (5000 моточасов).

Стоимость трактора с КЭУ можно рассчитать с помощью сравнения стоимости известных серийных машин с их гибридными аналогами. Как показывает практика, цена на подобные машины с КЭУ увеличивается, как правило, от 20 до 35%. Кроме этого, мы можем оценить прямые затраты на использование основных компонентов КЭУ. Так, цена тягового асинхронного электродвигателя мощностью 25 кВт находится в пределах 50 тыс. руб., стоимость тягового аккумулятора электрической энергии будет составлять около 150 тыс. руб. [4], силового инвертора – около 250 тыс. руб. Капиталовложения на приспособление электрооборудования и системы управления КЭУ – в пределах 150 тыс. руб. Из этого следует, что цена силовой установки в условиях малого производства увеличится более чем на 600 тыс. руб.

Так как у гибридной энергетической установки ДВС остается, то все эксплуатационные затраты на его обслуживание и ремонт сохраняются. Расход топлива у тракторов с КЭУ снижается за счет стабилизации нагрузочного режима в зоне минимального удельного расхода топлива, выключения двигателя во время малых нагрузок, а также возвращения энергии при торможении. Однако, как показывают результаты исследований, производительность КЭУ может быть ниже традиционной схемы из-за дополнительной двойной трансформации энергии в электрической передаче. В связи с этим последовательная схема КЭУ для тракторов, выполняющей работу, при условно стабильных режимах работы не будет иметь превосходства в расходе топлива в сравнении с дизельным ДВС. Параллельная схема КЭУ оставляет всю механическую передачу при передаче энергии, но в то же время, благодаря воз-

возможности выключить двигатель во время отсутствия нагрузок и уменьшить максимальную мощность двигателя, может быть более экономичной. Исходя из результатов ранее проведенных исследований [5–6] нами принят расход топлива при последо-

вательной схеме КЭУ – 6,0 л/час. Трактор с параллельной схемой на 20% экономичнее, т. е. – 5,0 л/час.

Компоновочная схема трактора на базе МТЗ-82 с КЭУ различных схем представлена на *рис. 1*.

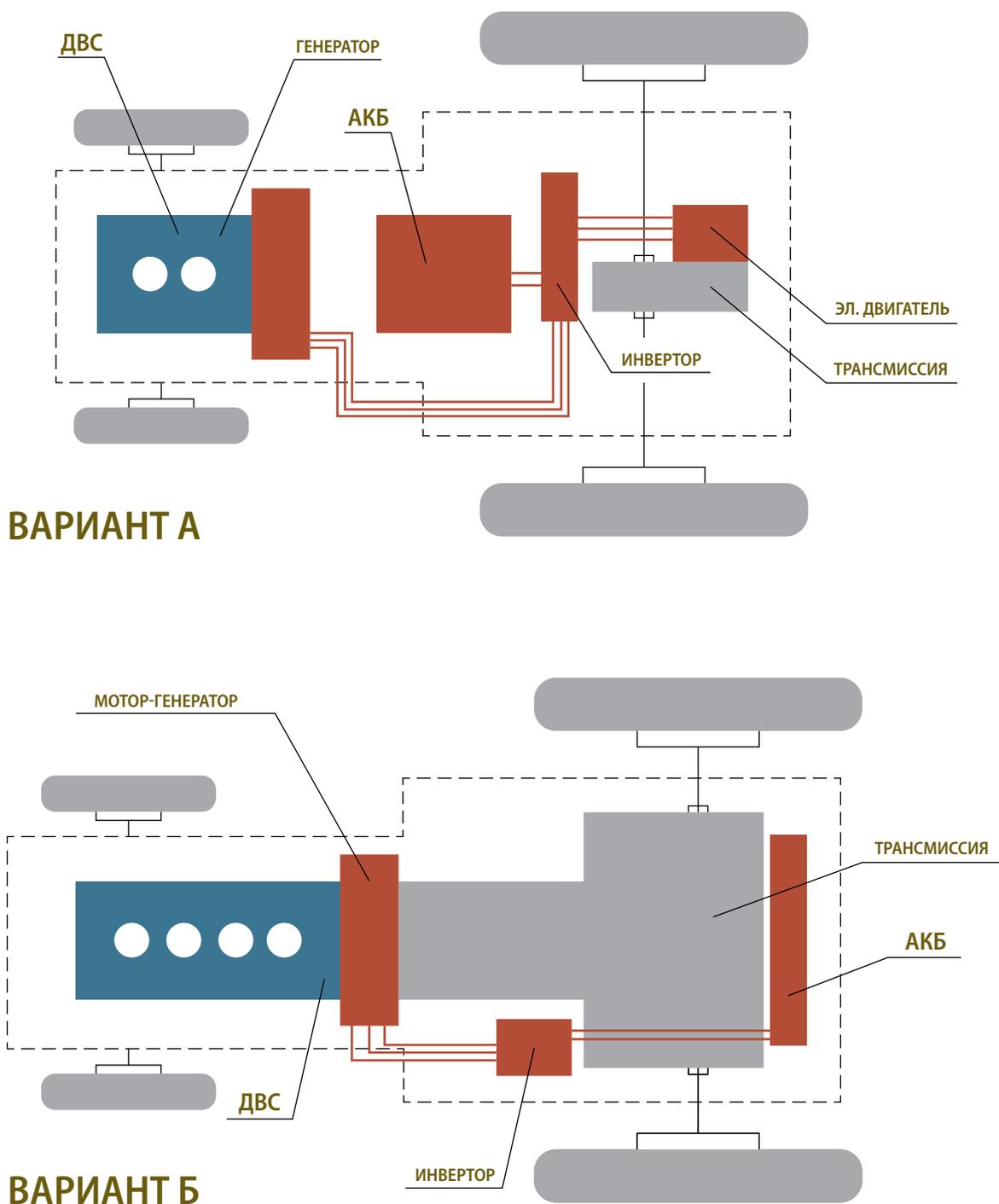


Рис. 1. Схемы конструкций типов КЭУ

Вариант А – последовательная схема передачи энергии;
 вариант Б – параллельная схема передачи энергии

В тракторе с электроприводом двигатель внутреннего сгорания отсутствует, а вместе с ним и сопутствующие системы охлаждения, запуска, питания и смазки. В коробке перемены передач будут отсутствовать сцепление и многоступенчатая трансмиссия [14–15].

Стоимость всех вышеперечисленных узлов и комплектующих, согласно данным поставщиков компонентов и оборудования, будет находиться в пределах 350 тыс. руб. Эту сумму можно вычесть из цены трактора.

Электрический привод трактора будет состоять из электродвигателя, номинальной мощностью около 50 кВт, тягового инвертора такой же выходной мощности и накопителя электрической энергии из LiFePO_4 батарей [16; 17].

Цена тягового электродвигателя, по данным поставщиков, составляет примерно 150 тыс. руб., инвертора – 350 тыс. руб., тягового накопителя энергии – примерно 1500 тыс. руб. При этом в расчете приняты характеристики аккумулятора LT-LYP200 емкостью 200 Ач, напряжением 3,2 В, массой около 10 кг. Таких аккумуляторов трактору понадобится в пределах 100 штук. Ресурс аккумуляторов составляет 2000 циклов (при глубине разряда не более 80%). Беспереывная мощность, которую выдает вся батарея, максимум 64 кВт.

Кроме этого, необходимо учесть, что трактор с электроприводом не будет нуждаться в техническом обслуживании, капитальных и средних ремонтах. Коробка перемены передач трактора с электроприводом не имеет переменных передач и сцепления, соответственно, не требует ремонта. Тормозная система трактора с электроприводом изнашивается меньше, так как реализуется рекуперативное торможение.

Сопровождающие капиталовложения, связанные с ремонтом ходовой части и рулевого управления, нами не рассматривались (для всех тракторов они одинаковые).

Результаты исследования

В табл. показана сравнительная характеристика результатов при эксплуатации тракторов с разными видами энергетических установок.

Эксплуатационные расходы нового трактора с различными типами энергетических установок за 10-летний период согласно расчетам будут составлять:

- трактор МТЗ-82 с ДВС – 10591,2 тыс. руб. (0,55 тыс. руб. / час);
- трактор с КЭУ (вариант А) – 11591 тыс. руб. (0,64 тыс. руб. / час);
- трактор с КЭУ (вариант Б) – 10708 тыс. руб. (0,64 тыс. руб. / час);
- трактор с электроприводом – 14141 тыс. руб. (0,74 тыс. руб. / час).

На рис. 2 показаны сравниваемые траты при работе машины с разными видами энергетических систем.

Выводы

Можно заключить, что при учете затрат на приобретение нового трактора, топливо (электроэнергию), техническое обслуживание и ремонт, принимая во внимание возобновление работоспособности в период полного срока эксплуатации энергетических установок, трактор с КЭУ обойдется на 6% дешевле, трактор с электроприводом – на 9% дороже.

Расчеты свидетельствуют о том, что использование трактора МТЗ-82 с дизельным двигателем, с учетом изначально низкой цены и небольшой стоимости возобновления функциональности агрегатов, обходится дешевле. Эксплуатация трактора с КЭУ оказывается примерно в таком же ценовом диапазоне. Применение сельскохозяйственной машины с электроприводом из-за очень высокой цены на аккумуляторы энергии и короткого ресурса в настоящий момент экономически не выгодно.

Уменьшение цены трактора МТЗ-82 с гибридной энергетической установкой или

тяговым электроприводом может быть для конкретной выполняемой работы, возможно при повышении эффективности параметров аккумулятора энергии, тягового электродвигателя и инвертора для конкретной выполняемой работы, создании системы для замены отработавших резерв накопительных батарей на новые.

Сводная таблица затрат на эксплуатацию тракторов с различными типами энергетических установок

Наименование критерия	Затраты, тыс. руб.			
	трактор с ДВС	трактор с КЭУ		трактор с электроприводом
		послед. схема (А)	паралл. схема (Б)	
Первоначальная стоимость	1400	2000	2000	3000
Расход топлива, вид, энергии в час	6 литров диз. топлива	6 литров диз. топлива	5 литров диз. топлива	эл. энергия 20 кВт*ч
Расходы на топливо (эл. энергию) в час	0,276*	0,276*	0,230*	0,120**
Срок эксплуатации, лет	10			
Продолжительность работы за срок эксплуатации, часов	19200			
Затраты на топливо (электроэнергию) за весь срок эксплуатации	$19200 \cdot 0,46 = 5299,2$	$19200 \cdot 0,46 = 5299,2$	$19200 \cdot 0,368 = 4416$	$19200 \cdot 0,12 = 2034$
Зарядное устройство	–	–	–	50
Техническое обслуживание каждые 125 моточасов	20			2****
Затраты на ТО, всего за 10 лет	$19200/125 \cdot 20 = 3072$			$19200/125 \cdot 2 = 307,2$
Текущий ремонт всего за 10 лет (тыс. руб.):				
– ремонт топливной аппаратуры		150		–
– замена сцепления		80		–
– ремонт тормозной системы		30		15
– ремонт КПП		80		–
Кап. ремонт энергетической установки	$120 \cdot 4 = 480$	$200 \cdot 2 + 480 = 880$		$1500 \cdot 1 = 1500$ ***
Всего затрат	$1400 + 5299,2 + 3072 + 150 + 80 + 30 + 80 + 480 = 10591,2$	$2000 + 5299,2 + 3072 + 150 + 80 + 30 + 80 + 880 = 11591,2$	$2000 + 4416 + 3072 + 150 + 80 + 30 + 80 + 880 = 10708$	$3000 + 2034 + 50 + 307,2 + 15 + 1500 = 6906,2$
Приведенные затраты на 1 час работы трактора	$10591,2/19200 = 0,55$	$11591,2/19200 = 0,60$	$10708/19200 = 0,56$	$12206,2/19200 = 0,36$
* Цена одного литра дизельного топлива – 46 руб.				
** Цена электроэнергии – 6 руб./кВт*ч.				
*** Замена комплекта аккумуляторов каждые 2000 циклов разряда-заряда (16000 моточасов работы).				
**** Предусмотрена доливка и замена масла в редукторе ведущего моста, обслуживание ходовой части.				

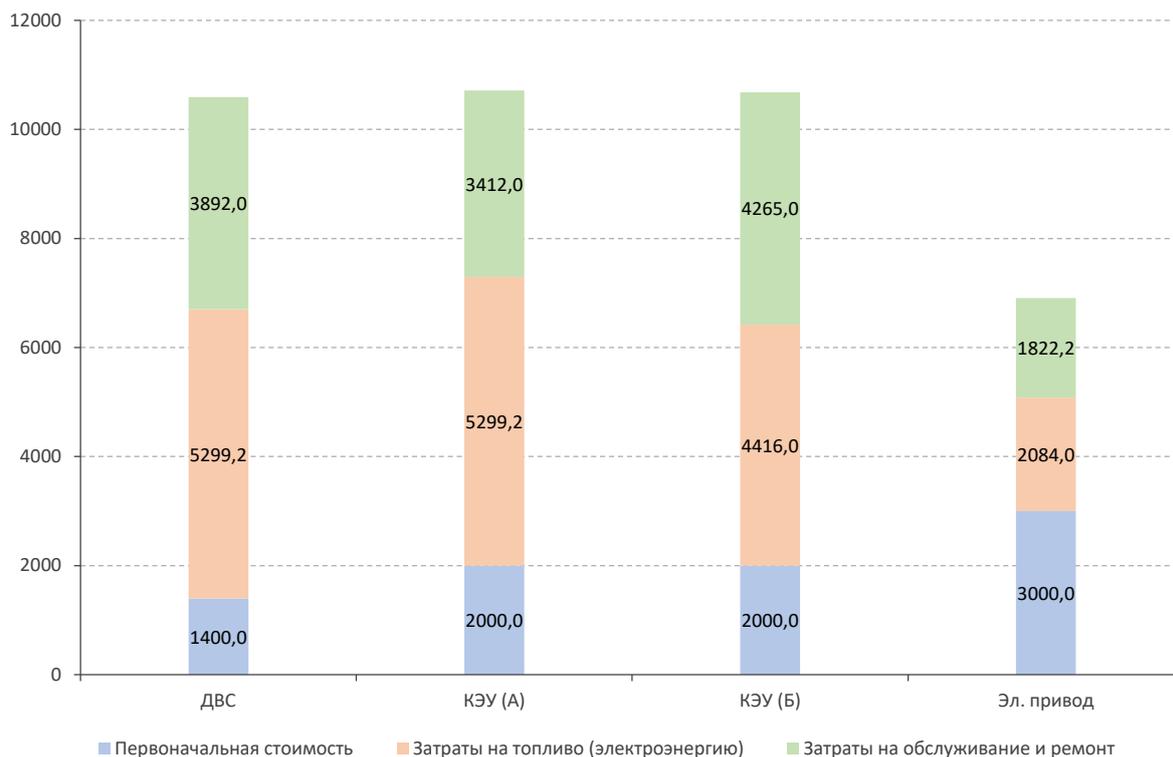


Рис. 2. Сравнительная характеристика затрат на тракторы с разными видами энергетических установок в течение 10-летнего периода, тыс. руб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочегаров Д.А., Лемешева Е.В., Тихомиров П.В. Сравнительный анализ альтернативных видов топлива для транспортных средств // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. Т. 2. № 2. С. 373–378.
2. Капустин А.А. Методика оценки влияния типа двигателя гибридных автомобилей на их экономичность и экологическую безопасность // Организация и безопасность движения в крупных городах: сб. тр. XII междунар. науч.-практ. конф. СПб.: СПбГАСУ, 2016. С. 639–645.
3. Нечитайло Ю.А. Энергетические режимы гибридной силовой установки // Информационные технологии и инновации на транспорте: мат-лы междунар. науч.-практ. конф.; под общ. ред. А.Н. Новикова. Орел, 2015. С. 116–121.
4. Александров И.К., Несговоров Е.В., Раков В.А. Тяговый расчет транспортных средств с адаптивным приводным двигателем // Вестн. машиностроения. 2010. № 2. С. 16–18.
5. Смирнов А.В., Раков В.А. Определение необходимой мощности ДВС гибридных силовых установок транспортных средств // Вестн. машиностроения. 2010. № 4. С. 32–35.
6. Асадов Д.Г. Исследование рынка аккумуляторных батарей для гибридных автомобилей // Междунар. техн.-экон. журн. 2011. № 2. С. 124–127.
7. Раков В.А., Литвинов В.И. Стабилизация нагрузочного режима ДВС трактора путем использования комбинированной энергоустановки // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 1. С. 3–9.
8. Раков В.А., Литвинов В.И. Расчет мощности двигателя гибридной энергетической установки сельскохозяйственной машины // АгроЗооТехника. 2020. Т. 3. № 1. С. 4.
9. Раков В.А., Литвинов В.И. Определение необходимой мощности двигателя комбинированной энергетической установки трактора // Изв. С.-Петербург. гос. аграр. ун-та. 2019. № 3 (56). С. 145–151.

10. Использование комбинированной энергоустановки с накопителем энергии на тракторе / М.Н. Ерохин [и др.] // Тр. НАМИ. 2009. № 241. С. 119–122.
11. Эксплуатация и обслуживание автомобилей с гибридными силовыми установками: монография. Вологда: ВоГУ, 2014. 143 с.
12. Инновационные решения технологических процессов в животноводстве: учебн. пособие / А.В. Маклахов [и др.]; Сев.-Запад. науч.-исслед. ин-т молочн. и лугопастб. хоз-ва, Вологод. гос. молочнохоз. акад. им. Н.В. Верещагина. Вологда – Молочное, 2016.
13. Ксиневи́ч И.П., Ипатов А.А., Изосимов Д.Б. Технология гибридных автомобилей, состояние и пути развития отечественной автомобильной техники с комбинированными энергоустановками // Мобильная техника, 2003.
14. Белоусов Б.Н., Попов С.Д. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
15. Конструктивные схемы автомобилей с гибридными силовыми установками: учебн. пособие / С.В. Бахмутов [и др.]. М.: Изд-во МГТУ «МАМИ», 2007. 71 с.
16. Раков В.А., Литвинов В.И. Оценка экономической эффективности использования комбинированных и электрических энергоустановок в сельскохозяйственных машинах // Изв. С.-Петербург. гос. аграр. ун-та. 2020. № 2 (59). С. 123–128.
17. Раков В.А., Литвинов В.И. Обеспечение устойчивого нагрузочного режима двигателя внутреннего сгорания сельскохозяйственной машины за счет применения комбинированной энергоустановки // АгроЗооТехника. 2020. Т. 3. № 2. С. 2.

Сведения об авторах

Вячеслав Александрович Раков – кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет». Российская Федерация, 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; e-mail: vyacheslav.rakov@mail.ru

Владимир Игоревич Литвинов – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина». Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Емельянова, д. 1; e-mail: lit.vinov@mail.ru

ECONOMIC VALUE ANALYSIS OF USING HYBRID AND ELECTRIC MOTORS IN TRACTORS

Rakov V.A., Litvinov V.I.

One of the ways to increase the efficiency of using tractors is to broaden the power plant economic parameters. This can be achieved by using electricity in a power plant, i.e. either combined or fully electric power plants. But such power plants are rather expensive and have a short battery reserve. Taking into account the ambiguity of the issue and the agricultural enterprises' great interest, the article analyzes the likely costs during the use of MTZ-82 tractors with a diesel engine, combined and fully electric power plant. The assessment is based on data obtained by

comparing experimental machines with those in use. The analysis considered the initial price of the machine on the basis of tractor MTZ-82, fuel consumption (electricity), the specified time of usage, additional costs on charging from the external power grid, cost of maintenance of each tractor, taking into account its characteristics and investment in overhaul. The total costs for ten years of use of each tractor are calculated by adding up all of the above costs. While the cost of one liter of diesel fuel is 46 rubles, and the cost of one kWh of electricity is 6 rubles; the LiFePO4 battery life is 2000 discharge-charge cycles. According to the analysis results, the costs of the machines operating were as follows: MTZ-82 diesel engine – 0.55 thousand rubles per hour; hybrid power plant of serial/parallel circuit – 0.6/0.56 thousand rubles per hour; electric power plant – 0.36 thousand rubles per hour. The authors revealed that under these operating conditions, the transition of MTZ-82 tractor to hybrid electric power plants is economically inefficient. Working on a fully electric power plant will reduce costs by 1.5 times.

Tractor, combined power plants, fuel consumption, efficiency, evaluation, electric drive, costs.

Information about the authors

Vyacheslav A. Rakov – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “The Vologda State University”. 15, Lenina Street, Vologda, 160000, Russian Federation; e-mail: vyacheslav.rakov@mail.ru

Vladimir I. Litvinov – Candidate of Sciences (Agriculture), Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin”. 1, Emel’yanova Street, Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: ktsa@mf.molochnoe.ru