

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЭС ТЯГОВОГО КЛАССА 0,6 С АВТОНОМНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ****З. А. Годжаев, С. Е. Сенькевич, И. С. Алексеев, Н. А. Майстренко, С. Ю. Уютов**

**Реферат.** В данной статье описано проведение экспериментальных исследований мобильного энергосредства (МЭС) с автономным электроприводом тягового класса 0,6 в полевых условиях для оценки его функциональных свойств. Объектом исследования является МЭС тягового класса 0,6 на базе самоходных шасси Т-16 с электроприводом. Замена механической силовой передачи с ДВС на автоматизированный электропривод с ЭД позволила изменить некоторые характеристики МЭС. Цель исследования – оценка функциональных свойств МЭС тягового класса 0,6 с применением автономного ЭП в качестве силовой установки путем проведения экспериментальных исследований в полевых условиях. Площадка для полевых измерений представляла собой клетку поля учебно-опытного хозяйства территории полевой опытной станции РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. Экспериментальные исследования режимов движения мобильного энергосредства (разгон и установившийся режимы), приведенные в рамках настоящей статьи, проводились на фоне стерня колосовых. Высота стерни составляла 0,12-0,15 м, влажность почвы 12-13%. Время испытаний – летний (послеуборочный) период года. Повторность измерений принята трехкратной, скорость движения МЭС – 1,5 м/с. Результатом проведенных исследований показали снижение эксплуатационной массы в среднем на 300 кг, улучшились тягово-сцепные и динамические показатели. Получены относительные изменения тягового КПД для варианта МЭС с ДВС – 0,652, для -варианта МЭС с электроприводом – 0,680. Максимальное значение коэффициента интенсивности колебаний центра масс МЭС, составляет не более 3,03 при максимально допустимом значении в 4,0. Для совершенствования функциональных характеристик МЭС по энергообеспечению и по энергоэффективности при дальнейшем освоении серийного производства МЭС, необходимо сохранить принципиальную схему электромеханической трансмиссии. Однако, необходим выбор более оптимальной схемы соединений с минимальным омическим сопротивлением и подбором новых литий-ионных АКБ с увеличенной емкостью.

**Ключевые слова:** экспериментальные исследования, автономный электропривод, электродвигатель, мобильное энергетическое средство, трактор.

**Введение.** Расчетно-экспериментальные исследования в области сельского хозяйства, в частности исследования мобильных энергосредств (МЭС), проводятся регулярно. Выбор направления проводимых исследований может быть связан с особенностями почвенно-климатических условий региона, как в статьях [1, 2]. Давление на почву, оказываемое МЭС и его орудиями, изучение его влияния, прогнозирование и оптимальное распределение являются направлениями для экспериментов, рассмотренные в статьях [3, 4, 5]. Изучением движения МЭС, в частности, влияние неровностей почвы [6, 7, 8], прицепного оборудования и скорости МЭС на его траекторию и возможность управления опрокидыванием МЭС занимались в работе [9]. В публикациях [10, 11] выясняли может ли форма МЭС значительно влиять на его работу. А в статье [12] экспериментировали со схемой управления беспилотным трактором. Нагруженность и ее влияние на эффективность МЭС также является темой исследований, по которой проводятся эксперименты в статьях [13, 14]. Гибридный алгоритм оценки массы системы тягача-полуприцепа экспериментально проверялся в статье [15]. Различные варианты топлива и способы их подачи, влияющие на работу МЭС также становятся темами исследований, как в статьях [16, 17]. Экспериментами по замене силовых систем, работающих

на углеродном топливе и использующих двигатели внутреннего сгорания (ДВС), на более экологичные системы с водородными топливными элементами занимались в статьях [18, 19]. Помимо экспериментов, связанных с изменениями в конструкциях тракторов, проводятся и эксперименты, направленные на проверку методик испытаний и подтверждение их адекватности как в статьях [20, 21].

Анализ вышеприведенных научных работ подтверждает, что применение электропривода (ЭП) в машинах сельскохозяйственного назначения одна из актуальных задач в настоящее время. В связи с этим, экспериментальные данные, полученные в реальных условиях эксплуатации МЭС, имеют первостепенную значимость при проектировании качественно новой машины.

Цель исследования – оценка функциональных свойств МЭС тягового класса 0,6 с применением автономного ЭП в качестве силовой установки путем проведения экспериментальных исследований в полевых условиях.

**Условия, материалы и методы.** Объектом исследования является МЭС тягового класса 0,6 на базе самоходных шасси Т-16 с ЭП. Электропривод был установлен взамен классического двигателя внутреннего сгорания. Мощность электродвигателя составляла 11 кВт, двигателя внутреннего сгорания 18 кВт. Вал электродвигателя напрямую соединен с первичным валом

коробки переключения передач. Первичным источником энергии служит блок аккумуляторных батарей. ЭД через векторный преобразователь частоты подключен к блоку аккумуляторных батарей. После переоборудования масса объекта исследования снизилась с 1800 кг до 1500 кг.

Программа-методика экспериментальных исследований по разработанному и изготовленному макетному образцу МЭС с ЭП силовой передачи позволит получить новые экспериментальные данные для верификации коэффициентов математической модели, подтверждения её адекватности, установление эффективности внедрения электрического привода в силовую передачу мобильного энергетического средства тягового класса 0,6. Первоначальным шагом перед проведением испытаний был расчет координаты центра тяжести макетного образца для этого были установлены датчики для считывания опорных реакций на колесах, что было подробно рассмотрено в работах [22, 23].

После разработки и изготовления экспериментальной установки, подбора комплекта необходимого регистрирующего оборудования, а также измерительных приборов, удалось определить в реальных условиях эксплуатации основные силовые характеристики работы МЭС.

Для обработки полученных экспериментальных данных, (ускорения отдельных масс МЭС - центра масс остова, центра масс бортов) применялся коэффициент интенсивности восприятия колебаний  $K_{\text{инт}}$ , определяемый по методике, приведенной в работах [17, 18].

Коэффициент интенсивности  $K_{\text{инт}}$  рассчитывался по формуле:

$$K_{\text{инт}} = \frac{18}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \cdot \sigma_z \quad (1)$$

где  $\sigma_z$  – среднее квадратическое отклонение вертикальных ускорений при гармонических колебаниях,

$\omega_0 = 62,8 \text{ с}^{-1}$  – частота приведения,

$\omega$  – частота колебаний.

Площадка для полевых испытаний представляла собой клетку поля учебно-опытного хозяйства НА территории полевой опытной станции РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева. Нагрузка на крюке МЭС осуществлялась при помощи транспортного прицепа 2ПТСЕ. Бортовой компьютер, сопряженный с датчиками, а также генератор для его питания разместили в кузове МЭС.

Опыты проводились на горизонтальном участке поля с уклоном не более  $2^\circ$  при строго прямолинейном движении. После осуществления подготовки машины в стационарных условиях (зарядка аккумулятора, калибровка датчиков и настройка приборов) МЭС направлялся в поле, где производилась дополнительная проверка работы приборов. Исследования режимов движения трактора (разгон и установившийся режимы) проводились на различных фонах: на грунтовой дороге, на стерне и на поле, подготовленном под посев. В рамках настоящей статьи представлены исследования только на стерне.

Время испытаний – летний (послеуборочный) период года. Повторность принята трехкратной. Высота стерни составляла 0,12-0,15 м, влажность почвы 12-13%, скорость движения МЭС – 1,5 м/с. Общий вид МЭС при испытаниях представлен на рисунке 1.



Рис. 1 – МЭС при испытаниях на стерне

Тягово-энергетические показатели были определены по измеренным значениям для опытного МЭС с ДВС и МЭС с электродвигателем.

Необходимо соблюдение баланса мощности и тягового КПД мобильного энергосредства:

$$\eta_T = \eta_{тр} \cdot \eta_{\delta} \cdot \eta_f \quad (2)$$

$$N_T = N_B - N_{пот} = N_B - N_{тр} - N_{\delta} - N_f, \text{ кВт} \quad (3)$$

где  $N_e$  – мощность двигателя мобильного энергосредства, кВт;

$N_{пот}$  – суммарные потери мощности двигателя на движение мобильного энергосредства.

$N_{тр}$  – потери мощности в трансмиссии мобильного энергосредства, кВт;

$N_{\delta}$  – потери мощности на буксование, кВт.

$N_f$  – потери мощности на качение мобильного энергосредства, кВт;

$\eta_{\delta}$  – КПД мобильного энергосредства по буксованию.

$\eta_f$  – КПД мобильного энергосредства по качению.

$\eta_{тр}$  – механический КПД трансмиссии.

$\eta_T$  – тяговый КПД мобильного энергосредства.

Значения тягового КПД определяют по формуле

$$\eta_m = (1 - \delta) \cdot \eta_{mp} \cdot \frac{P_{кр}}{P_k} \quad (4)$$

где  $P_{кр}$  – сила сопротивления на крюке мобильного энергосредства, кН;

$P_k$  – сила касательная на колесе мобильного энергосредства, кН.

$\delta$  – коэффициент буксования на заданном режиме;

Рассчитываются значения действительных скоростей движения по формуле:

$$V_d = (1 - \delta_x) \omega_k \cdot r_k, \text{ м/с}, \quad (5)$$

где  $\delta_x$  – коэффициент буксования на заданном режиме;

$\omega_k$  – угловая скорость колеса, рад/с;

$r_k$  – угловая скорость колеса, м.

Составляющие тягового КПД мобильного энергосредства и потерь мощности двигателя по формулам:

$$N_{тр} = N_B (1 - \eta_{тр}), \text{ кВт}, \quad (6)$$

где  $N_{тр}$  – потери мощности в трансмиссии мобильного энергосредства, кВт;

$\eta_{тр}$  – механический КПД трансмиссии.

$$N_{\delta} = N_B \cdot \eta_{тр} \cdot \delta_x, \text{ кВт}, \quad (7)$$

где  $N_{\delta}$  – потери мощности на буксование, кВт.

$$\eta_{\delta} = 1 - \delta_x \quad (8)$$

где  $\eta_{\delta}$  – КПД мобильного энергосредства по буксованию.

$$N_f = P_f \cdot V_d; \quad \eta_f = \frac{P_{кр}}{P_k} \quad (9)$$

где  $N_f$  – потери мощности на качение мобильного энергосредства, кВт;

$P_f$  – сила сопротивления качению, кН;

$V_d$  – действительная скорость движения мобильного энергосредства, м/с;

$\eta_f$  – КПД мобильного энергосредства по качению.

Полученные значения заносят в таблицу 3.

Тяговая мощность мобильного энергосредства, только с учетом тягового КПД определяется по формуле:

$$N_T = N_B \cdot \eta_T, \text{ кВт}. \quad (10)$$

где  $N_e$  – мощность двигателя мобильного энергосредства, кВт;

$\eta_T$  – тяговый КПД мобильного энергосредства.

**Результаты и обсуждение.** В результате проведения испытаний были получены экспериментальные осциллограммы измеряемых параметров на фоне – стерня, часть результатов приведена на рисунках 2-4.

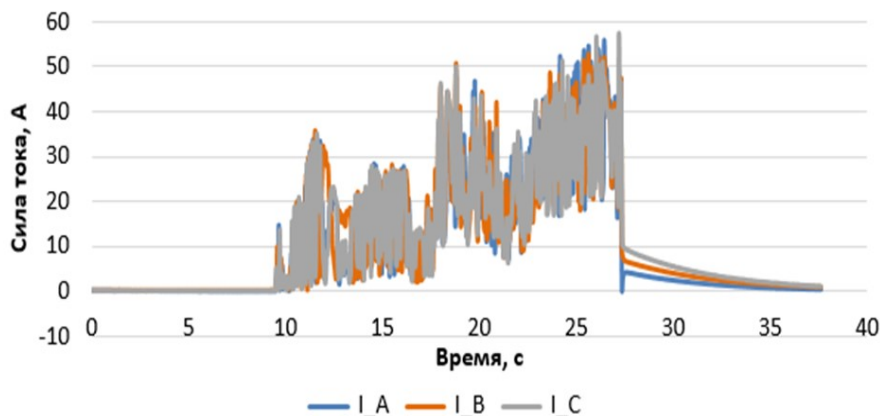


Рис. 2 – Осциллограмма фазных токов при измерениях на стерне во времени

Анализ измерений, при котором МЭС-прототип, с прицепом в качестве нагрузки на крюке, двигался по стерне на 4 передаче приведен ниже.

Осциллограмма тяговой нагрузки приведена на рисунке 3, осциллограмма ускорения центра масс остова МЭС представлена на рисунке 4.

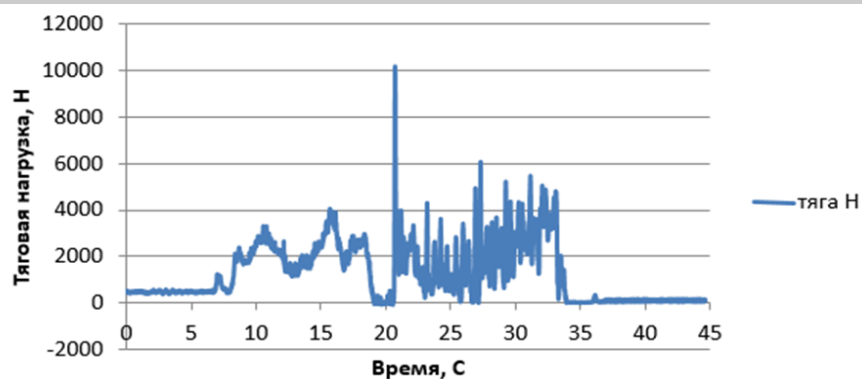


Рис. 3 – Осциллограмма тяговой нагрузки при измерениях на стерне

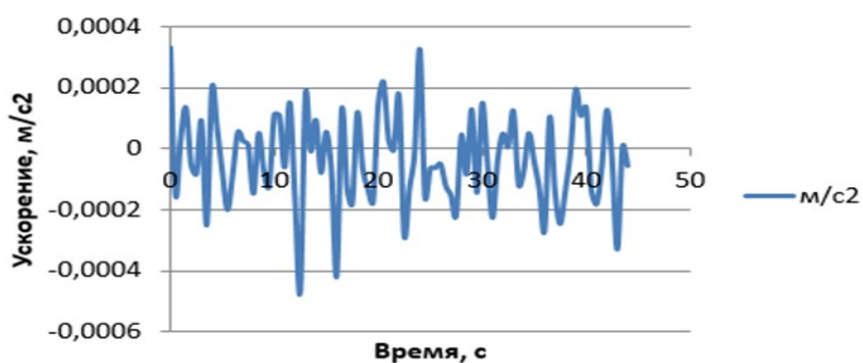


Рис. 4 – Осциллограмма горизонтальных ускорения центра масс остова МЭС

В программной среде MathCad Prime 4.0 был проведен спектральный анализ сигналов измеряемых величин. Были получены

спектральные плотности этих сигналов. Нормированные спектральные плотности показаны на рисунках 5, 6.

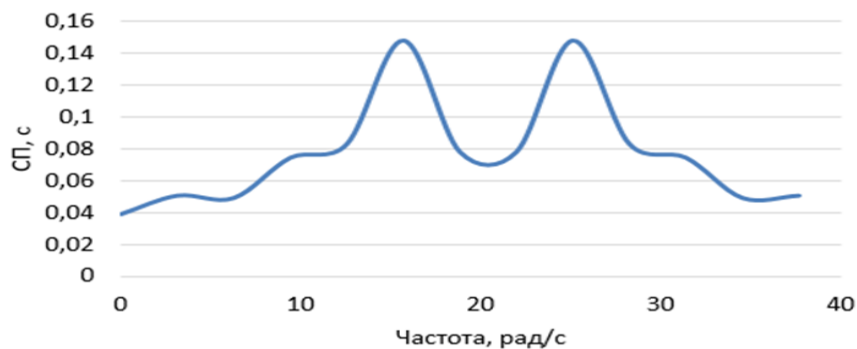


Рис. 5 – Нормированная спектральная плотность горизонтальных ускорений остова МЭС при частотах возмущений

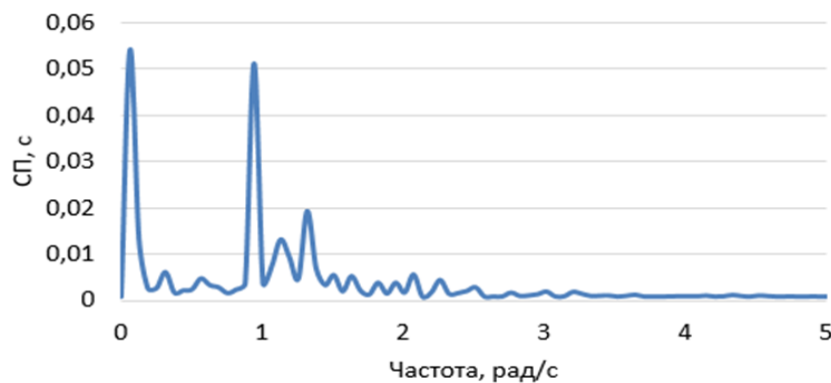


Рис. 6 – Нормированная спектральная плотность тягового сопротивления при частотах возмущений

Нормированная спектральная плотность ускорений центра масс МЭС (рис. 5) имеет две ярко выраженные преобладающие частоты на отметках  $\omega_1=15,5$  рад/с и  $\omega_2=25,5$  рад/с. Эти частоты нам необходимы для определения коэффициента интенсивности восприятия по данным с датчиков ускорений левого –  $K_{лев}$ ,

правого бортов –  $K_{прав}$ , а также центра масс МЭС –  $K_{центр}$  (табл. 1).

Нормированная спектральная плотность тягового сопротивления (рис. 6) имеет ярко выраженные преобладающие частоты на отметках  $\omega_1=0,38$  рад/с;  $\omega_2=0,88$  рад/с;  $\omega_3=1,26$  рад/с.

Таблица 1 – Таблица коэффициентов интенсивности восприятия

| № | $K_{лев}$ | № | $K_{прав}$ | № | $K_{центр}$ |
|---|-----------|---|------------|---|-------------|
| 1 | 1,99      | 1 | 2,76       | 1 | 2,12        |
| 2 | 2,84      | 2 | -          | 2 | 3,03        |

Анализ таблицы 1 показывает, что, конструктивные изменения, а именно установка автономного ЭП улучшают условия труда оператора за счет понижения вибраций в центре масс МЭС, при этом максимальное значение коэффициента интенсивности колебаний

составляет не более 3,03 (допускается - не более 4,0).

Вероятностные показатели случайных параметров опыта на стерне такие как математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратическое отклонение представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики случайных величин показателей МЭС с ЭП

| Показатели                             | Параметры | Мат. ожидание | Дисперсия | Ср. квадр. откл. | Коэфф. вариации |
|----------------------------------------|-----------|---------------|-----------|------------------|-----------------|
| Линейная скорость левого колеса, [м/с] |           | 1,489         | 0,092     | 0,303            | 0,203           |
| Сила тока фазы А, [А]                  |           | 16,891        | 79,165    | 8,897            | 0,527           |
| Сила тока фазы В, [А]                  |           | 17,160        | 77,711    | 8,815            | 0,514           |
| Сила тока фазы С, [А]                  |           | 17,613        | 86,792    | 9,316            | 0,529           |

Анализируя таблицу 2 видно, что скорость МЭС в целом равномерна. Это показывает и коэффициент вариации, оценивающий относительный разброс данных относительно их среднего значения (позволяя сравнить разнородность наборов данных с разными средними значениями или единицами измерения). Однако сила тока по фазам в целом показывает высокую вариабельность. Несмотря на это, значительной разницы между фазными токами не выявлена, следовательно, проблем в обмотках статора или ротора (межвитковое замыкание, обрыв фазы или неравномерное распределение сопротивления) не обнаружено. Незначительные флуктуации нагрузки на электрическую систему имели эпизодический характер и не оказали ощутимого влияния во время проведения опытов.

Изменение ёмкости аккумуляторных батарей представлено на рисунке 7. На рисунке

наглядно видно, что ёмкость батарей уменьшается с увеличением количества опытов (время эксплуатации). Учитывая то, что один опыт длился не более 5 минут, легко посчитать что ёмкость батарей очень быстро расходуется. Это является основным недостатком применения автономного ЭП.

Рисунок 7 подтверждает проведенные ранее исследования, где после 85 минут проведения опыта, начинается ускоренное снижение напряжения, связанное с истощением активной (реакционной) массы и ростом внутреннего сопротивления, и уже после 95 минут достигается порог 400 В, после чего система управления отключает АКБ, предотвращая глубокий разряд.

Составляющие потерь мощности двигателя МЭС представлены в таблице 3. Конструктивные изменения показали изменение мощностных потерь.

Таблица 3 – Составляющие мощностных потерь МЭС

| Источники мощностных потерь | Обозначение      | Сравнение показателей |                   |
|-----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|
|                             |                  | МЭС с ДВС (18,4 кВт)  | МЭС с ЭД (11 кВт) |
| Трансмиссия                 | $\eta_{mp}$      | 0,9                   | 0,9               |
|                             | $N_{mp}$ , кВт   | 1,84                  | 1,10              |
| Буксование                  | $\eta_\delta$    | 0,92                  | 0,92              |
|                             | $N_\delta$ , кВт | 1,325                 | 0,792             |
| Качение колеса              | $\eta_f$         | 0,788                 | 0,821             |
|                             | $N_f$ , кВт      | 2,663                 | 2,163             |
| МЭС в целом                 | $\eta_m$         | 0,652                 | 0,68              |
|                             | $N_{пот}$ , кВт  | 5,828                 | 4,055             |

Анализируя таблицу 3 видно, что потери мощности у МЭС с ЭД снизились на 30,4% за счет снижения потерь при качении колеса и

общих потерь мощности при буксовании. Потери мощности на качение снизились по причине снижения массы МЭС. При этом за

счет более высокого КПД самого ЭД относительно ДВС, произошли изменения функциональных характеристик МЭС. Например, полученные значения тяговой мощности МЭС, только с учетом тягового КПД (рассчитанные по формуле 10) имеют следующие значения: для МЭС с ДВС –  $N_{т,} = 11,99$  кВт; для МЭС с ЭД –  $N_{т,} = 7,48$  кВт.

Экспериментальные исследования доказали, что установка ЭД в силовом приводе МЭС, взамен ДВС, улучшает условий труда оператора по виброзащите, при этом максимальное значение коэффициента интенсивности колебаний центра масс МЭС, составляет не более 3,03 (допустимое – не более 4,0).

**Выводы.** По исследованиям, можно сделать следующие выводы:

1. Замена ДВС с механической силовой передачей на автоматизированный ЭП с ЭД не вызвала значительных изменений функциональных характеристик МЭС во время полевых испытаний;
2. Определено, что конструктивные

изменения улучшают условия труда оператора, так как максимальное значение коэффициента интенсивности колебаний составляет не более 3,03 (допускается – не более 4,0).

3. Выявлено, что потери мощности у МЭС с ЭД снизились на 30,4% за счет уменьшения потерь мощности при качении колеса. Это произошло в том числе и за счет более высокого КПД самого ЭД (по отношению к ДВС), что вызвало значительные изменения других функциональных характеристик МЭС во время полевых испытаний.

4. Для совершенствования функциональных характеристик МЭС по энергообеспечению и по энергоэффективности при дальнейшем освоении серийного производства МЭС, необходимо сохранить принципиальную схему электромеханической трансмиссии. Однако, необходим выбор более оптимальной схемы соединений с минимальным омическим сопротивлением и подбором новых литийионных АКБ с увеличенной удельной энергоемкостью.

#### Литература

1. Халилов М. Б., Абдулнатилов М. Б. Исследование пахотного агрегата // Известия Дагестанского ГАУ. 2022. № 4(16). С. 308-312. doi:10.52671/26867591\_2022\_4\_308.
2. Experiments and CFD simulation of an air-conditioned tractor cabin for thermal comfort of tractor operators in Pakistan / M. Riaz, M. H. Mahmood, M. N. Ashraf, et al. // Heliyon. 2023. Vol. 9 (12). doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e23038.
3. Исследования технологических параметров колёсного трактора в составе экспериментального прикапывающего агрегата / А. С. Шубин, Е. А. Яшков, Е. С. Поликутина и др. // Евразийское Научное Объединение. 2020. № 4-2(62). С. 139-142.
4. Development and validation of sloped ground pressure prediction model for a tracked tractor in hilly and mountainous environments / F. Yang, Q. Liu, H. Chu, et al. // Soil and Tillage Research. 2024. Vol. 241. P. 106135. doi: 10.1016/j.still.2024.106135.
5. Experimental study of the implement-and-tractor aggregate used for laying tracks of permanent traffic lanes inside controlled traffic farming systems / V. Bulgakov, S. Pascuzzi, V. Nadykto, et al. // Soil & Tillage Research. 2021. Vol. 208. P. 104895. doi: 10.1016/j.still.2020.104895.
6. Optimizing ploughing performance: The role of traction-control cylinder pressure on tractor wheel load / J. Čupera, P. Porteš, F. Bauer, et al. // Journal of Agriculture and Food Research. 2024. Vol. 18. P. 101515. doi: 10.1016/j.jafr.2024.101515.
7. Машков С. В., Ишкин П. А., Авдеев Д. А. Результаты лабораторно-полевых исследований культиватора модульного прицепного КМП-14 с ротационной бороной // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 3. С. 51-59. doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-2-51-59.
8. Экспериментальные исследования динамики поворота интегрального универсально-пропашного трактора / А. И. Завражнов, В. И. Оробинский, А. Н. Беляев и др. // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т. 12. № 2(61). С. 48-59. doi: 10.17238/issn2071-2243.2019.2.48.
9. Старцев А. В., Романов С. В., Романова Г. М. Результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента сопротивления самопередвижению машинно-тракторного агрегата // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 79-85. doi: 10.34286/1995-4646-2021-76-1-79-85.
10. Algorithm and scale experiment of gyro-based tractor rollover control towards hilly farmland application / L. Wang, J. Zhu, F. Liu et al. // Computers and Electronics in Agriculture. 2024. Vol. 220. P. 108925. doi: 10.1016/j.compag.2024.108925.
11. Kücüksarıyıldız H., Canlı E., Carman K. Experimentally detected aerodynamic drag coefficient of the agricultural tractor form considering effects of windshield angle and hood front shape // Energy. 2024. Vol. 296. P. 131167. doi: 10.1016/j.energy.2024.131167.
12. Adaptive disturbance observer-based fixed time nonsingular terminal sliding mode control for path-tracking of unmanned agricultural tractors / J. Sun, Z. Wang, S. Ding, et al. // Biosystems Engineering. 2024. Vol. 246. P. 96-109. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2024.06.013.
13. Подрубалов М. В., Клубничкин Е. Е., Бухтояров Л. Д. Экспериментальные исследования нагруженности трактора на уходе за лесными культурами с разными способами агрегатирования // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11. № 4(44). С. 170-180. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/15.
14. Определение средней крюковой нагруженности трактора в составе машинно-тракторного агрегата на вспашке / Д. Д. Нехорошев, Д. А. Нехорошев, А. Ю. Попов и др. // Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 3 (47). С. 75-81.
15. Mass estimation of tractor-semitrailer systems: An approach of dynamics and data fusion-driven in real environments Y. Jin, Y. Li, B. He, et al. // Measurement. 2024. Vol. 238. P. 115367. doi: 10.1016/j.measurement.2024.115367.
16. Kalwar A., Singh A. P., Agarwal A. K. Experimental Study of Fuel Injection Timing and Exhaust Gas Recirculation for Combustion Control in Diethyl Ether-Diesel Blend Fuelled Tractor Engine // Fuel. 2024. Vol. 371.

P. 131930. doi: 10.1016/j.fuel.2024.131930.

17. Use of diesel-biodiesel-bioethanol blends in farm tractors: first results obtained with a mixed experimental-numerical approach / M Bietresato, C Caligiuri, M Renzi, et al. // *Energy Procedia*. 2019. Vol. 158. P. 965-971. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.237.

18. Experimental validation of a predictive energy management strategy for agricultural fuel cell electric tractors / C Varlese, A Ferrara, C Hametner, et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 77. P. 1-14. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.097.

19. Parameters collaborative optimization design and innovation verification approach for fuel cell distributed drive electric tractor / X. Li, M. Liu, C. Hu, et al. // *Energy*. 2024. Vol. 292. P. 130485. doi: 10.1016/j.energy.2024.130485.

20. Experimental characterisation of front axle suspension systems for narrow-track tractors / M. Mattetti, S. Davoli, M. Maraldi, et al. // *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 185. P. 45-55. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.01.013.

21. К методике экспериментальной оценки маневренности автомобиля / А. В. Артемов, А. В. Школьных, С. М. Иванников и др. // Проблемы и перспективы конструктивного совершенствования отечественного автомобилестроения: материалы Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 12 апреля 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023. С. 106-113. doi: 10.58168/AutIndustry2023\_106-113.

22. Математическое моделирование динамических процессов сельскохозяйственного мобильного энергетического средства на электроприводе / З. А. Годжаев, С. Е. Сенькевич, И. С. Алексеев и др. // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024. Т. 25. № 1. С. 112-122. doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.1.112-122.

23. Обоснование выбора параметров электромеханической трансмиссии для трактора тягового класса 0,6-0,9 и согласование тяговых характеристик / З. А. Годжаев, С. Е. Сенькевич, И. С. Алексеев и др. // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. № 1. С. 63-70. doi:10.26897/2687-1149-2023-1-63-70.

#### Сведения об авторах:

Годжаев Захид Адыгезал оглы – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, профессор, председатель экспертного совета ГНЦ РФ, e-mail: fic51@mail.ru

ФГУП «НАМИ», Москва, Россия.

Сенькевич Сергей Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры ФН-7, e-mail: senkevichse@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Алексеев Илья Сергеевич – инженер лаборатории автоматизированного привода сельскохозяйственной техники, e-mail: dreeddog@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия.

Майстренко Николай Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка, e-mail: nmaystrenko@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, Москва, Россия.

Уютов Сергей Юрьевич – младший научный сотрудник лаборатории автоматизированного привода сельскохозяйственной техники, e-mail: uyutov10@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия.

#### EXPERIMENTAL STUDIES OF MOBILE POWER VEHICLE OF 0.6 TRACTION CLASS WITH AN AUTONOMOUS ELECTRIC DRIVE

Z. A. Godzhaev, S. E. Senkevich, I. S. Alekseev, N. A. Maystrenko, S. Yu. Uyutov

**Abstract.** This article describes experimental field studies of a mobile power vehicle of 0.6 traction class with an autonomous electric drive to evaluate its functional properties. The object of the study is a mobile power vehicle of 0.6 traction class based on a T-16 self-propelled chassis with an electric drive. Replacing the mechanical power transmission with an internal combustion engine with an automated electric drive with an electric motor allowed us to change some characteristics of mobile power vehicle. The objective of the study is to evaluate the functional properties of a mobile power vehicle of 0.6 traction class using an autonomous electric drive as the power plant through experimental field studies. The field measurement site was a field cell of the educational and experimental farm of experimental station of Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. Experimental studies of the mobile power vehicle motion modes (acceleration and steady-state modes), presented within the framework of this article, were conducted against the background of cereal stubble. The stubble height was 0.12-0.15 m, soil moisture was 12-13%. The test period was the summer (post-harvest) period of the year. The measurements were repeated three times, motion speed of mobile power vehicle was 1.5 m/s. The results of the conducted studies showed a decrease in the operating weight by an average of 300 kg, improved traction and dynamic performance. The relative changes in traction efficiency were obtained for mobile power vehicle with an internal combustion engine of 0.652, for mobile power vehicle with an electric drive - 0.680. The maximum value of mobile power vehicle's center-of-mass oscillation intensity factor is no more than 3.03, with a maximum permissible value of 4.0. To improve mobile power vehicle's energy supply and energy efficiency during further development of vehicle serial production, the basic electromechanical transmission design must be maintained. However, a more optimal connection diagram with minimal ohmic resistance and the selection of new lithium-ion batteries with increased capacity are necessary.

**Key words:** experimental studies, autonomous electric drive, electric motor, mobile power vehicle, tractor.

#### References

1. Khalilov MB, Abdulnatipov MB. [Study of a plowing unit]. *Izvestiya Dagestanskogo GAU*. 2022; 4(16). 308-312 p. doi:10.52671/26867591\_2022\_4\_308.

2. Riaz M, Mahmood MH, Ashraf MN. Experiments and CFD simulation of an air-conditioned tractor cabin for thermal comfort of tractor operators in Pakistan. *Heliyon*. 2023; Vol.9 (12). doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e23038.

3. Shubin AS, Yashkov EA, Polikutina ES. [Research of technological parameters of a wheeled tractor as part of an experimental rolling unit]. *Evraziyskoe nauchnoe obединenie*. 2020; 4-2(62). 139-142 p.

4. Yang F, Liu Q, Chu H. Development and validation of sloped ground pressure prediction model for a tracked tractor in hilly and mountainous environments. *Soil and tillage research*. 2024; Vol.241. 106135 p. doi: 10.1016/j.still.2024.106135.

5. Bulgakov V, Pascuzzi S, Nadykto V. Experimental study of the implement-and-tractor aggregate used for laying tracks of permanent traffic lanes inside controlled traffic farming systems. *Soil and tillage research*. 2021; Vol.208. 104895 p. doi: 10.1016/j.still.2020.104895.
6. Cupera J, Portes P, Bauer F. Optimizing ploughing performance: the role of traction-control cylinder pressure on tractor wheel load. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2024; Vol.18. 101515 p. doi: 10.1016/j.jafr.2024.101515.
7. Mashkov SV, Ishkin PA, Avdeev DA. [Results of laboratory and field studies of KMP-14 modular trailed cultivator with a rotary harrow]. *Izvestiya Samarskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2024; 3. 51-59 p. doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-2-51-59.
8. Zavrazhnov AI, Orobinskiy VI, Belyaev AN. [Experimental studies of the turning dynamics of an integral universal row-crop tractor]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019; Vol.12. 2(61). 48-59 p. doi: 10.17238/issn2071-2243.2019.2.48.
9. Startsev AV, Romanov SV, Romanova GM. [Results of experimental studies to determine the coefficient of resistance to self-movement of a machine-tractor unit]. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskij zhurnal*. 2021; 1. 79-85 p. doi: 10.34286/1995-4646-2021-76-1-79-85.
10. Wang L, Zhu J, Liu F. Algorithm and scale experiment of gyro-based tractor rollover control towards hilly farmland application. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024; Vol.220. 108925 p. doi: 10.1016/j.compag.2024.108925.
11. Kucuksariyildiz H, Canli E, Carman K. Experimentally detected aerodynamic drag coefficient of the agricultural tractor form considering effects of windshield angle and hood front shape. *Energy*. 2024; Vol.296. 131167 p. doi: 10.1016/j.energy.2024.131167.
12. Sun J, Wang Z, Ding S. Adaptive disturbance observer-based fixed time nonsingular terminal sliding mode control for path-tracking of unmanned agricultural tractors. *Biosystems Engineering*. 2024; Vol.246. 96-109 p. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2024.06.013.
13. Podrupalov MV, Klubnichkin EE, Bukhtoyarov LD. [Experimental studies of tractor load during forest crop maintenance with different aggregation methods]. *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2021; Vol.11. 4(44). 170-180 p. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/15.
14. Nekhoroshev DD, Nekhoroshev DA, Popov AY. [Determination of the average hook load of a tractor as part of a machine-tractor unit during plowing]. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*. 2023; 3(47). 75-81 p.
15. Jin Y, Li Y, He B. Mass estimation of tractor-semitrailer systems: an approach of dynamics and data fusion-driven in real environments et al. *Measurement*. 2024; Vol.238. 115367 p. doi: 10.1016/j.measurement.2024.115367.
16. Kalwar A, Singh AP, Agarwal AK. Experimental study of fuel injection timing and exhaust gas recirculation for combustion control in diethyl ether-diesel blend fuelled tractor engine. *Fuel*. 2024; Vol.371. 131930 p. doi: 10.1016/j.fuel.2024.131930.
17. Bietresato M, Caligiuri C, Renzi M. Use of diesel-biodiesel-bioethanol blends in farm tractors: first results obtained with a mixed experimental-numerical approach. *Energy Procedia*. 2019; Vol.158. 965-971 p. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.237.
18. Varlese C, Ferrara A, Hametner C. Experimental validation of a predictive energy management strategy for agricultural fuel cell electric tractors. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024; Vol.77. 1-14 p. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.097.
19. Li X, Liu M, Hu C. Parameters collaborative optimization design and innovation verification approach for fuel cell distributed drive electric tractor. *Energy*. 2024; Vol.292. 130485 p. doi: 10.1016/j.energy.2024.130485.
20. Mattetti M, Davoli S, Maraldi M. Experimental characterization of front axle suspension systems for narrow-track tractors. *Biosystems Engineering*. 2019; Vol.185. 45-55 p. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.01.013.
21. Artemov AV, Shkolnykh AV, Ivannikov SM. Towards a methodology for experimental assessment of vehicle maneuverability. Problems and prospects of design improvement of the domestic automobile industry]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Voronezh, 12 aprelya 2023 goda. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskij universitet im. G.F.Morozova*. 2023; 106-113 p. doi: 10.58168/AutIndustry2023\_106-113.
22. Godzhaev ZA, Senkevich SE, Alekseev IS. [Mathematical modeling of dynamic processes of an agricultural mobile power vehicle with an electric drive]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2024; Vol.25. 1. 112-122 p. doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.1.112-122.
23. Godzhaev ZA, Senkevich SE, Alekseev IS. [Justification for the selection of electromechanical transmission parameters for 0.6-0.9 traction class tractor and coordination of traction characteristics]. *Agroinzheneriya*. 2023; Vol.25. 1. 63-70 p. doi:10.26897/2687-1149-2023-1-63-70.

#### Authors:

Godzhaev Zakhid Adygezal oglu – Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Chairman of the Expert Council of the State Research Center of the Russian Federation, e-mail: fic51@mail.ru

FSUE "NAMI", Moscow, Russia.

Senkevich Sergey Evgenievich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Department of FN-7, e-mail: senkevichse@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Alekseev Ilya Sergeevich – an engineer of the Laboratory of Automated Drives for Agricultural Machinery, e-mail: dreeddog@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia.

Maystrenko Nikolay Aleksandrovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Machine and Tractor Fleet Operation, e-mail: nmaystrenko@rgau-msha.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazeva, Moscow, Russia.

Uyutov Sergey Yurevich – junior researcher of the Laboratory of Automated Drive of Agricultural Machinery, e-mail: uyutov10@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia.