

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 62-838

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-63-70

**Обоснование выбора параметров электромеханической трансмиссии для трактора тягового класса 0,6-0,9 и согласование тяговых характеристик***Захид Адыгезалович Годжаев, член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор*fic51@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>*Сергей Евгеньевич Сенькевич, канд. техн. наук, доцент*umo.viesh@list.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6354-7220>*Илья Сергеевич Алексеев<sup>✉</sup>, инженер*dreeddog@mail.ru<sup>✉</sup>*Екатерина Николаевна Ильченко, инженер*

kat-sama@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

**Аннотация.** Выбор параметров электромеханической трансмиссии для трактора тягового класса 0,6-0,9 проводится на основе анализа тягово-сцепных характеристик полнокомплектной машины. Авторами произведены теоретические расчеты характеристик рабочих процессов трактора-прототипа с двигателем внутреннего сгорания и трактора-макета с электрическим приводом, тяговый расчет трактора-прототипа и трактора-макета, расчет характеристик электропривода и электродвигателей. Для проведения расчетов выбрана 6-ступенчатая механическая коробка переменных передач. Исходные данные для выполнения расчетов получены по результатам тяговых испытаний тракторов в Северо-Кавказской МИС. Выбраны два профильных фона опорного основания: поле под посев (пар) и стерня. В результате исследований установлено, что трактор-макет, созданный на базе самоходного шасси тягового класса 0,6...0,9 мощностью до 50 кВт, на фоне «Поле, подготовленное под посев» реализует наибольший тяговый КПД (0,53) с электродвигателем 15 кВт и максимальное крюковое усилие (5,78 кН) с электродвигателем 18 кВт. На фоне «Стерня» для электродвигателей 15, 18 и 22 кВт тяговый КПД составляет 68%, но трактор-макет с электродвигателем мощностью 22 кВт может реализовать максимальное крюковое усилие, равное 11,35 кН. Максимальная тяговая мощность 16,7 кН отмечена у трактора-прототипа с двигателем внутреннего сгорания. Следовательно, наиболее подходящей заменой ДВС по тяговому КПД может быть только электродвигатель мощностью 15 кВт.

**Ключевые слова:** трактора тягового класса 0,6-0,9, электропривод, тяговый КПД, максимальная тяговая мощность, максимальное крюковое усилие

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

© Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Алексеев И.С., Ильченко Е.Н., 2023

## ORIGINAL PAPER

**Justification of the parameters of an electromechanical transmission for a tractor of traction class of 0.6-0.9 traction class and coordination of traction characteristics***Zakhid A. Godzhaev, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng)*

fic51@mail.ru

*Sergey E. Senkevich, PhD (Eng), Associate Professor*

umo.viesh@list.ru

*Ilya S. Alekseev<sup>✉</sup>, engineer*dreeddog@mail.ru<sup>✉</sup>*Ekaterina N. Ilchenko, engineer*

kat-sama@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

**Abstract.** The parameters of electromechanical transmission for the tractor of 0.6-0.9 traction class are selected based on the analysis of traction and hitching characteristics of the complete machine. The authors have made theoretical calculations of the operating characteristics of the prototype tractor with an internal combustion engine and the tractor layout with an electric drive, traction calculation of the prototype tractor and the tractor layout, and calculation of the characteristics of the electric drive

and electric motors. For the calculations, a six-speed manual variable gearbox was selected. The initial data for performing the calculations were obtained from the results of tractor traction tests in the North Caucasian machine test station. Two profile backgrounds of the support base were selected: a field prepared for sowing (fallow) and stubble. As a result of research, it was established that a tractor-model designed on the basis of the self-propelled chassis of a pulling class 0.6 to 0.9 with capacity up to 50 kW on the "Field prepared for sowing" background reaches the greatest towing efficiency (0.53) with the 15 kW electric motor and the greatest drawbar pull (5.78 kN) with the 18 kW electric motor. On the "Stubble" background, for 15, 18 and 22kW electric motors, the pulling efficiency is 68%, but the tractor layout with the 22kW electric motor can develop the maximum drawbar pull of 11.35kN. The maximum pulling power of 16.7 kN is observed in the prototype tractor with an internal combustion engine. Therefore, the 15-kW electric motor can be the only most suitable substitute for a combustion engine by traction efficiency.

**Keywords:** tractors of traction class 0.6 to 0.9, electric drive, traction efficiency, maximum pulling power, maximum drawbar pull

**For citation:** Godzhaev Z.A., Senkevich S.E., Alekseev I.S., Pchenko E.N. Justification of the choice of parameters of an electromechanical transmission for a tractor of traction class of 0.6-0.9 traction class and coordination of traction characteristics. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(1):63-70. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-63-70>.

**Введение.** Основные параметры обеспечения и повышения работоспособности машин тягового класса 0,6...0,9 в сельском хозяйстве разработаны 30-70 лет назад, и их нормативные значения в основном касаются образцов машин отечественного производства. Необходимо разработка современных отечественных тракторов с учетом местных эксплуатационных условий [1] и перехода отечественной техники к нетрадиционным и возобновляемым источникам энергии и, в частности, к использованию электрической энергии. В нашей стране эксплуатируется множество тракторов малого класса тяги. Учитывая преимущества и недостатки конструкций таких тракторов, можно найти оптимальное решение в создании схем с применением электропривода.

Зарубежными исследователями установлено, что производительность электрического трактора AWD может быть улучшена за счет оптимизации батареи посредством моделирования работы трактора в различных условиях [2]. В исследовании [3] предложена двухходовая сцепная трансмиссионная система (DICPS), которая с оптимальной конфигурацией ключевых параметров может значительно повысить общий КПД примерно на 9,8% (при вспашке) в сравнении с одномоторной трансмиссионной системой (SMPS). В работе [4] представлен прототип мощностью 9 кВт, состоящий из двух трехфазных асинхронных двигателей, двух независимых инверторов и свинцово-кислотного аккумуляторного блока. Показано, что предлагаемый электротягач технически осуществим с точки зрения эксплуатационных характеристик по сравнению с аналогичным двигателем внутреннего сгорания. В работе [5] предложен метод, основанный на режиме привода двухдвигательной муфты. Для оптимизации параметров использовался алгоритм оптимизации роя частиц (PSO), основанный на смешанной штрафной функции. В работе [6] предложена оптимальная схема управления, расширяющая традиционный регулятор скольжения, с оптимизацией уставки на основе оценки почвенных условий, а именно оценки параметров колеса-грунта. Оптимизация учитывает эффективность тяги и коэффициент чистой тяги и адаптивно регулирует заданное значение в изменяющихся почвенных условиях. Предложенная методика может быть реализована на сельскохозяйственных

тракторах, оснащенных гидравлическими или электрическими бесступенчатыми трансмиссиями с использованием обратной связи по крутящему моменту привода.

Анализ характеристик синхронных, асинхронных [7-11] и вентильно-индуктивных двигателей (ВИД)<sup>1</sup> [12-14] и различных видов приводов, их достоинств и недостатков показал, что наиболее приемлемым является асинхронный электродвигатель как самый распространенный и недорогой тип двигателя в нашей стране.

**Цель исследований:** выбор параметров электромеханической трансмиссии для трактора тягового класса 0,6-0,9 и проведение анализа тягово-сцепных характеристик полнокомплектной машины.

**Материалы и методы.** Произведены теоретические расчеты характеристик рабочих процессов трактора-прототипа с ДВС и трактора-макета с электрическим приводом, тяговый расчет трактора-прототипа и трактора-макета, расчет характеристик электропривода и электродвигателей.

Расчет, построение и анализ теоретической тяговой характеристики трактора производились в три этапа.

#### 1. Формирование исходных данных

Для проведения расчетов выбрана 6-ступенчатая механическая КПП, позволяющая сохранить высокий КПД в процессе работы трактора. Исходные данные для выполнения расчетов получены по результатам тяговых испытаний тракторов в ФГБУ «Северо-Кавказская МИС». Для сравнения поведения объектов исследования на разных покрытиях выбраны два профильных фона опорного основания: поле под посев (пар) и стерня.

#### 2. Расчет и построение тяговой характеристики

Тяговый расчет проводится согласно методике<sup>1</sup>.

Значения угловой скорости ( $\omega_d$ ) и крутящего момента ( $M_k$ ) рассчитываются по формулам:

$$\omega_d = \frac{2\pi n}{60}, \text{ с}^{-1}, \quad (1)$$

где  $n$  – значение частоты вращения коленвала двигателя, об/мин;  $2\pi$  – постоянная величина для перевода

<sup>1</sup> Шкарлет А.Ф., Исмаилов В.А. Основы теории и расчета трактора и автомобиля: Методические указания к лабораторным работам. Зерноград: Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия, 2006. 60 с.

оборотов в радианы, рад/об; 60 – переводной коэффициент, с/мин.

$$M_k = \frac{N_e}{\omega_d} \cdot 10^3, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2)$$

где  $N_e$  – мощность двигателя, кВт.

По произведенным расчетам построены регуляторные характеристики двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя. Для ДВС построение проведено по данным регуляторной характеристики двигателя (в статье расчетная таблица не приведена). Методика [10] включает в себя построение лучевой диаграммы касательных сил тяги трактора.

Значения максимальных касательных сил тяги  $P_{k \max}$ , развиваемых трактором на каждой передаче, определяются по формуле:

$$P_{k \max} = \frac{M_{k \max} \cdot i_{\text{тp},i} \cdot \eta_{\text{тp}}}{r_k} 10^{-3}, \text{ кН}, \quad (3)$$

где  $M_{k \max}$  – значение предельного крутящего момента двигателя, кН/м;  $i_{\text{тp},i}$  – передаточное число трансмиссии на  $i$ -й передаче;  $\eta_{\text{тp}}$  – механический КПД силовой передачи трактора, для колесного трактора  $\eta_{\text{тp}} = 0,88 \dots 0,91$ ;  $r_k$  – кинематический радиус качения трактора, м.

Для колесного трактора

$$r_k = \frac{D}{2} + H(1 - f_o), \quad (4)$$

где  $D$  – посадочный диаметр обода колеса, м;  $f_o$  – коэффициент деформации шины, равный 0,14...0,16;  $H$  – высота шины, м. Для большинства тракторных шин высота профиля  $H$  и ширина профиля  $B$  совпадают ( $H = B$ ).

Значения максимальных касательных сил тяги трактора на передачах заносятся в таблицу (в рамках статьи полная таблица не приведена).

Сила сопротивления качению трактора  $P_f$ , кН,

$$P_f = f \cdot m_{\text{тp}} \cdot g \cdot K_\delta \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления качению, для колесного трактора на стерне  $f = 0,08 \dots 0,10$ , на поле под посев  $f = 0,11 \dots 0,14$ ;  $m_{\text{тp}}$  – эксплуатационная масса трактора, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $K_\delta$  – коэффициент балласта, равный 1.

Касательная сила тяги на колесе равна сумме крутяковой нагрузки и силе сопротивления перекачивания:

$$P_k = P_{\text{кр}} + P_f,$$

где  $P_{\text{кр}}$  – крутяковое усилие, реализуемое трактором, кН.

Тяговое КПД определяется по формуле:

$$\eta_m = (1 - \delta) \cdot \eta_{\text{тp}} \cdot \frac{P_{\text{кр}}}{P_k}, \quad (6)$$

где  $\delta$  – коэффициент буксования, взятый по экспериментальным данным.

Построение кривой буксования производилось с учетом выбранного фона по экспериментальным данным (характеристики буксования) трактора.

По данным тягового КПД трактора строится кривая тягового КПД  $\eta_t = f(P_{\text{кр}})$ .

Тяговые показатели на всех передачах рассчитываются для основного режима движения, перегрузочного и номинального. Для каждого выбранного режима определяется мощность двигателя.

Тяговая мощность трактора определяется по формуле:

$$N_m = N_e \cdot \eta_m, \text{ кВт}. \quad (7)$$

Кривые тяговой мощности трактора  $N_m = f(P_{\text{кр}})$  строятся на разных передачах.

При построении кривых угловой скорости коленчатого вала двигателя и действительной скорости движения трактора на каждой передаче рассчитываются значения действительных скоростей движения:

$$V_d = \frac{\omega_d \cdot r_k}{i_{\text{тp},i}} (1 - \delta_x), \text{ м/с}, \quad (8)$$

где  $\delta_x$  – коэффициент буксования на заданном режиме;  $i_{\text{тp},i}$  – передаточное число на  $i$ -й передаче.

Расчет и построение кривых часового и удельного расходов топлива производятся на выбранных режимах для основных передач. Значения удельного тягового расхода топлива в каждой точке определяются по формуле:

$$g_m = 10^3 \frac{G_m}{N_m}, \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}, \quad (9)$$

где  $G_m$  – часовой расход топлива, кг/ч;  $N_m$  – тяговая мощность, кВт.

При уменьшении тяговой нагрузки и тяговой мощности трактора удельный тяговый расход топлива увеличивается, стремясь к бесконечности. В связи с этим определяется предельное расчетное значение удельного тягового расхода топлива, называемого оценочным. Оценочный удельный тяговый расход рассчитывается на каждой передаче по той же формуле, причем значения  $G_m$  и  $N_m$  для этого режима определяются из построенных графиков  $G_m = f(P_{\text{кр}})$  и  $N_m = f(P_{\text{кр}})$  при тяговом усилии, равном половине от максимального на конкретной передаче. Тяговое усилие при минимальном удельном расходе на каждой передаче соответствует точке максимальной тяговой мощности. По полученным данным строятся зависимости  $g_m = f(P_{\text{кр}})$ .

### 3. Анализ тяговой характеристики трактора

Анализ тяговой характеристики трактора проводится для трех характерных передач: высшей, низшей и оптимальной (при максимальной тяговой мощности). На каждой выбранной передаче из графика определяются тягово-энергетические показатели и фиксируются в таблице основные показатели трактора на характерных передачах на номинальном режиме.

Рассчитываются составляющие тягового КПД трактора и потери мощности двигателя:

$$N_{\text{тp}} = N_e (1 - \eta_{\text{тp}}), \quad (10)$$

где  $N_{\text{тp}}$  – потери мощности в трансмиссии трактора, кВт;  $\eta_{\text{тp}}$  – механический КПД трансмиссии.

$$N_{\delta} = N_e \cdot \eta_{тр} \cdot \delta_x, \tag{11}$$

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

$$\eta_{\delta} = 1 - \delta_x, \tag{12}$$

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

$$N_f = P_f \cdot V_{\delta}; \eta_f = \frac{P_{кр}}{P_k}, \tag{13}$$

где  $N_f$  – потери мощности на качение трактора, кВт;  $P_f$  – сила сопротивления качению, кН;  $V_{\delta}$  – действительная скорость движения трактора, м/с;  $\eta_f$  – КПД трактора по качению.

Для расчета использован общий случай качения эластичного колеса по деформируемой поверхности со следующими допущениями: колесо движется равномерно по горизонтальному участку пути, сопротивление воздуха отсутствует. Такие условия описаны в работе профессора Г.М. Кутькова<sup>2</sup>.

Полученные данные заносятся в таблицу составляющих потерь мощности двигателя на характерных передачах (в статье полные таблицы не приводятся).

При выполнении расчетов необходимо соблюдение балансов тягового КПД и мощности трактора:

$$\eta_m = \eta_{тр} \cdot \eta_{\delta} \cdot \eta_f; \tag{14}$$

$$N_m = N_e - N_{ном} = N_e - N_{мп} - N_{\delta} - N_f, \tag{15}$$

где  $N_{ном}$  – суммарные потери мощности двигателя на движение трактора.

**Результаты и их обсуждение.** Тяговая характеристика позволяет решать практические вопросы тяговой загрузки трактора и агрегатирования его с рабочей машиной, выбора оптимальных режимов работы (скорости движения, передачи и т.д.).

Результат тягового расчета трактора-прототипа на фоне «Поле, подготовленное под посев» представлен в таблицах 1, 2.

Таблица 1. Основные показатели трактора-прототипа на характерных передачах на номинальном режиме для фона «Поле, подготовленное под посев»

Table 1. Main indicators of the prototype tractor on characteristic gears in the nominal mode for the “Field prepared for sowing” background

Основные показатели Main characteristics	Характерные передачи / Characteristic transmissions		
	низшая / lowest	оптимальная / optimal	высшая / highest
Максимальная тяговая мощность, $N_m$ , кВт / Maximum pulling power, $N_m$ , kW	9,84	12,55	6,72
Тяговый КПД, $\eta_m$ (при max $N_m$ ) / Traction efficiency, $\eta_m$ (at max $N_m$ )	0,395	0,504	0,27
Тяговое усилие, $P_{кр}$ , кН / Traction force, $P_{кр}$ , kN	11,8	5,29	1,4
Скорость движения, $V_{\delta}$ , м/с / Movement speed, $V_{\delta}$ , m/s	0,835	2,383	6,217
Часовой расход топлива, $G_m$ , кг/ч / Hourly fuel consumption, $G_m$ , kg/h	6,11	6,11	6,11
Удельный расход топлива, $g_m$ , г/кВт·ч / Specific fuel consumption, $g_m$ , g/kW·h	2982,26	486,87	908,82

Таблица 2. Составляющие потерь мощности двигателя трактора-прототипа на характерных передачах для фона «Поле, подготовленное под посев»

Table 2. Components of the engine power losses of the tractor-prototype on characteristic gears for the “Field prepared for sowing” background

Источники потерь мощности Sources of power loss	Обозначение Designation	Характерные передачи / Characteristic transmissions		
		низшая / lowes	оптимальная / optimal	высшая / highest
Трансмиссия / Transmission	$\eta_{тр}$	0,9	0,9	0,9
	$N_{мп}$ , кВт	2,49	2,49	2,49
Буксование / Slipping	$\eta_{\delta}$	0,53	0,69	0,81
	$N_{\delta}$ , кВт	10,56	7,03	4,29
Качение * / Rolling *	$\eta_f$	0,83	0,69	0,37
	$N_f$ , кВт	2	5,72	14,92
Трактор в целом / Tractor in general	$\eta_m$	0,4	0,42	0,27
	$N_{ном}$ , кВт	15,06	15,24	21,71
Тяговая мощность (полезная) / Traction power (net)	$N_m$ , кВт	9,84	9,66	3,19

\*Согласно формуле (13) есть прямая зависимость параметра от скорости движения МЭС, а также от характеристик фона, на котором произведён расчет.

\*According to formula (13), there is a direct relationship between the parameter and the mobile power tool speed, as well as on the characteristics of the background against which the calculation was made.

<sup>2</sup> Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства. М.: КолосС, 2004. 504 с.

Анализируя показатели таблицы 1, можно сказать, что на фоне «Поле, подготовленное под посев» у трактора-прототипа на оптимальной передаче – максимальная тяговая мощность, а минимальное тяговое усилие, развиваемое на крюке, наблюдается на высшей передаче.

Согласно данным таблицы 2 на фоне «Поле, подготовленное под посев» трактор-прототип на высшей передаче имеет значительные потери по мощности (до 88%).

По результатам расчётов построены скоростная и тяговая характеристики трактора-прототипа на фоне «Поле, подготовленное под посев» (рис. 1, 2). Тяговый расчет

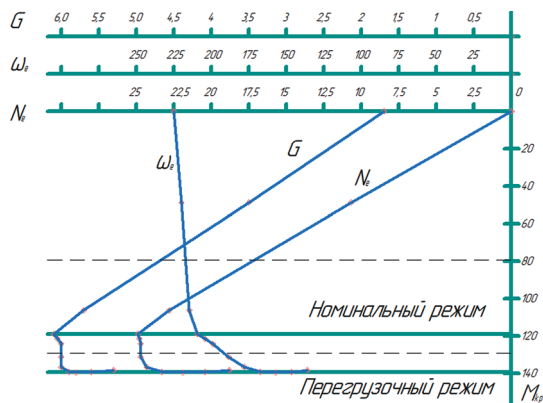


Рис. 1. Скоростная характеристика двигателя трактора-прототипа на фоне «Поле, подготовленное под посев»

Fig. 1. Speed characteristic of the engine of the prototype tractor against the “Field prepared for sowing” background

трактора-прототипа, представленный на рисунке 2, показал, что для раскрытия нереализуемого потенциала прототипу не хватает сцепного веса по реализации касательной силы тяги (на рисунке отмечено пунктирными линиями).

Результат тягового расчета трактора-прототипа на фоне «Стерня» представлен в таблицах 3, 4. На фоне «Стерня» трактор-прототип способен наиболее полно реализовать тяговую мощность и тяговое усилие на крюке (табл. 3).

Трактор-прототип на низшей и оптимальной передаче на фоне «Стерня» имеет сравнительно невысокие значения потерь тяговой мощности (в среднем до 32%) (табл. 4).

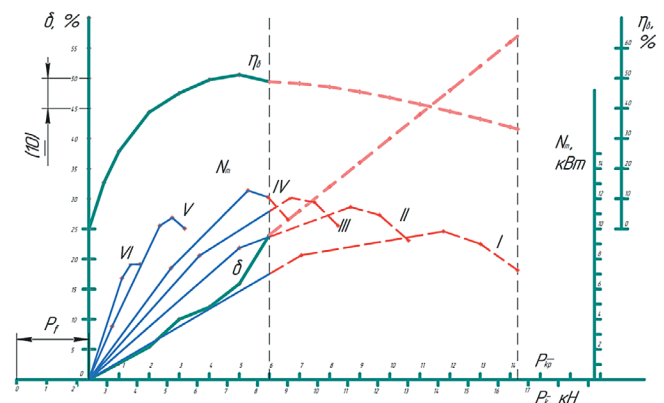


Рис. 2. Тяговая характеристика трактора-прототипа на фоне «Поле, подготовленное под посев» (--- нереализуемый потенциал)

Fig. 2. Traction characteristics of the prototype tractor against the “Field prepared for sowing” background (--- unrealizable potential capacity)

Таблица 3. Основные показатели трактора-прототипа на характерных передачах на номинальном режиме для фона «Стерня»  
Table 3. Main indicators of the prototype tractor in characteristic gears in the nominal mode against the “Stubble” background

Основные показатели Main indicators	Характерные передачи / Characteristic transmissions		
	низшая / lowes	оптимальная / optimal	высшая / highest
Тяговая мощность, $N_m$ , кВт / Pulling power, $N_t$ , kW	16,65	16,73	8,14
Тяговый КПД, $\eta_m$ / Traction efficiency, $\eta_m$	0,66	0,67	0,33
Тяговое усилие, $P_{кр}$ , кН / Traction force, $P_{кр}$ , kN	14,28	10,74	2,01
Скорость движения, $V_{\rho}$ , м/с / Movement speed, $V_{\rho}$ , m/s	0,86	1,16	3,93
Часовой расход топлива, $G_m$ , кг/ч / Hourly fuel consumption, $G_m$ , kg/h	6,1	6,1	6,1
Удельный расход топлива, $g_m$ , г/кВт·ч / Specific fuel consumption, $g_m$ , g/kW·h	366,46	364,55	749,17

Таблица 4. Составляющие потерь мощности двигателя трактора-прототипа на характерных передачах для фона «Стерня»  
Table 4. Components of the engine power losses of the tractor-prototype on characteristic gears against the “Stubble” background

Источники потерь мощности Sources of power loss	Обозначение Designation	Характерные передачи / Characteristic transmissions		
		низшая / lowes	оптимальная / optimal	высшая / highest
Трансмиссия / Transmission	$\eta_{тр}$	0,90	0,90	0,90
	$N_{мп}$ , кВт	2,49	2,49	2,49
Буксование / Slipping	$\eta_{\delta}$	0,88	0,92	0,99
	$N_{\delta}$ , кВт	2,75	1,69	0,28
Качение / Rolling	$\eta_f$	0,86	0,82	0,42
	$N_f$ , кВт	2,77	3,72	12,62
Трактор в целом / Tractor in general	$\eta_m$	0,68	0,68	0,37
	$N_{ном}$ , кВт	8	7,91	15,4
Тяговая мощность (полезная) / Traction power (net)	$N_m$ , кВт	16,90	16,9940	9,50

По результатам расчётов построены тяговые характеристики (рис. 3).

По такой же методике проведены тяговые расчеты трактора-макета с разными моделями электродвигателя мощностью 15, 18,5 и 22 кВт.

Расчет для трактора-макета с ЭД 15 кВт показал, что на фоне «Поле, подготовленное под посев» трактор-макет имеет меньшую тяговую мощность на оптимальной передаче, чем трактор-прототип. Максимальное значение тягового усилия – на крюке на низшей передаче, однако оно гораздо меньше, чем у трактора-прототипа. По сравнению с трактором-прототипом трактор-макет имеет низкие показатели. На фоне «Стерня» трактор-макет на всех передачах имеет меньшие значения тяговой мощности и тягового усилия, чем у трактора-прототипа. На рисунках 4-6 приведены результаты тяговых расчетов трактора-макета с электродвигателем 15 кВт.

В таблице 5 представлены основные показатели на оптимальных передачах для сравнения значений

двигателя внутреннего сгорания трактора-прототипа и трактора-макета с электродвигателем (ЭД1 15 кВт, ЭД2 18 кВт, ЭД3 22 кВт) на различных фонах («Поле, подготовленное под посев» и «Стерня»).

Согласно данным таблицы 5 на фоне «Поле, подготовленное под посев» максимальное крюковое усилие реализует трактор-макет с электродвигателем 18 кВт, а тяговая мощность остаётся максимальной у трактора-прототипа. На фоне «Стерня» тяговый КПД одинаковый (68%), однако максимальное крюковое усилие  $P_{кр}$  может реализовать трактор-макет с электродвигателем мощностью 22 кВт, в то время как тяговая мощность остаётся максимальной у трактора-прототипа.

Сравнительные значения показателей трактора-прототипа с ДВС и трактора-макета с электродвигателем различной мощности (ЭД1 15 кВт, ЭД2 18 кВт, ЭД3 22 кВт) на оптимальной передаче для фона «Поле, подготовленное под посев» представлены на рисунке 7, для фона «Стерня» – на рисунке 8.

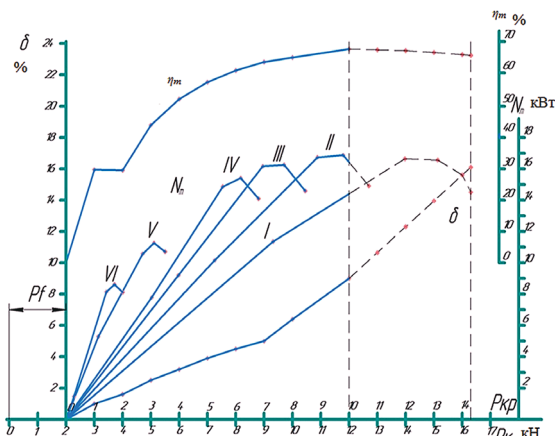


Рис. 3. Результат тягового расчета трактора-прототипа на фоне «Стерня» (----- нереализуемый потенциал)

Fig. 3. Results of the traction calculation of the prototype tractor against the “Stubble” background (----- unrealizable potential capacity)

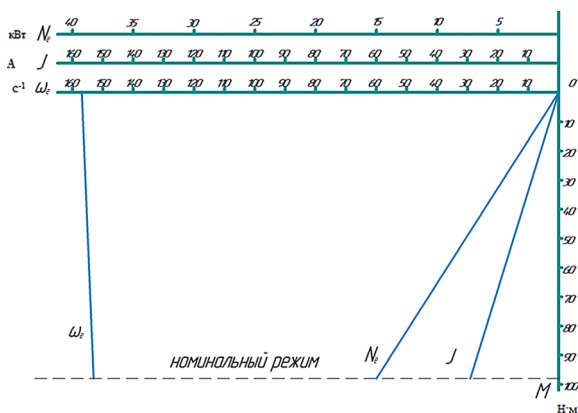


Рис. 4. Скоростная характеристика трактора-макета с электродвигателем 15 кВт на фоне «Поле, подготовленное под посев»

Fig. 4. Speed characteristic of a mockup tractor with an electric motor of 15 kW against the “Field prepared for sowing” background

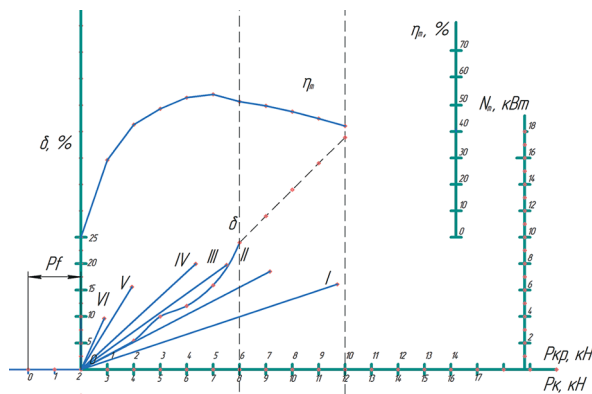


Рис. 5. Тяговая характеристика трактора-макета с электродвигателем 15 кВт на фоне «Поле, подготовленное под посев» (----- нереализуемый потенциал)

Fig. 5. Traction characteristics of a mockup tractor with an electric motor of 15 kW against the “Field prepared for sowing” background (----- unrealizable potential capacity)

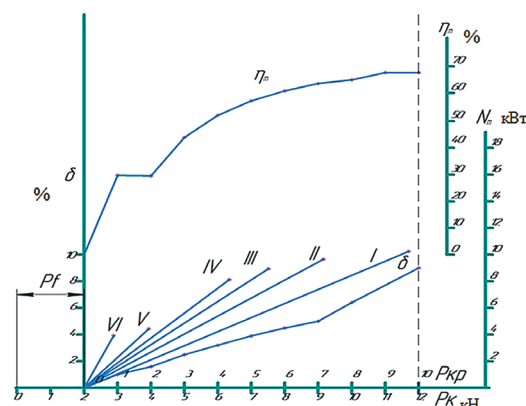


Рис. 6. Тяговая характеристика экспериментального трактора-макета с электродвигателем 15 кВт на фоне «Стерня»

Fig. 6. Traction characteristics of an experimental mockup tractor with an electric motor of 15 kW against the “Stubble” background

Таблица 5. Сравнительные значения двигателя внутреннего сгорания трактора-прототипа и трактора-макета с электродвигателем разной мощности

Table 5. Comparative indicators of the internal combustion engine of a prototype tractor and a mockup tractor with an electric motor of different power characteristics

Показатель Indicator	ДВС ICE	Электродвигатель / Electric motor		
		15 кВт	18 кВт	22 кВт
<b>Фон «Поле, подготовленное под посев» / Background «Field prepared for sowing»</b>				
Тяговая мощность, $N_m$ , кВт / Pulling power, $N_m$ , kW	12,55	8,39	9,6	11,37
Тяговый КПД, $\eta_m$ / Traction efficiency, $\eta_m$	0,504	0,53	0,52	0,52
Тяговое усилие, $P_{кр}$ , кН / Traction force, $P_{кр}$ , kN	5,29	4,34	5,78	3,73
Скорость движения, $V_p$ , м/с / Movement speed, $V_p$ , m/s	1,158	1,85	1,68	3,01
Часовой расход топлива, $G_m$ , кг/ч / Hourly fuel consumption, $G_m$ , kg/h	6,11	29,1	35,5	41,3
Удельный расход топлива, $g_m$ , г/кВт·ч / Specific fuel consumption, $g_m$ , g/kW·h	486,87	-	-	-
Удельная потребляемая сила тока $W$ , А/кВт / Specific power consumption $W$ , A/kW	-	3,65	3,7	3,63
<b>Фон «Стерня» / "Stubble" background</b>				
Тяговая мощность, $N_m$ , кВт / Pulling power, $N_m$ , kW	16,7	10,23	12,63	14,94
Тяговый КПД, $\eta_m$ / Traction efficiency, $\eta_m$	0,672	0,68	0,68	0,68
Тяговое усилие, $P_{кр}$ , кН / Traction force, $P_{кр}$ , kN	10,886	9,7	9,23	11,35
Скорость движения, $V_p$ , м/с / Movement speed, $V_p$ , m/s	1,862	1,06	1,36	1,32
Часовой расход топлива, $G_m$ , кг/ч / Hourly fuel consumption, $G_m$ , kg/h	6,1	29,1	35,5	41,3
Удельный расход топлива, $g_m$ , г/кВт·ч / Specific fuel consumption, $g_m$ , g/kW·h	364,55	-	-	-
Удельная потребляемая сила тока $W$ , А/кВт / Specific power consumption $W$ , A/kW	-	2,84	2,8	2,77

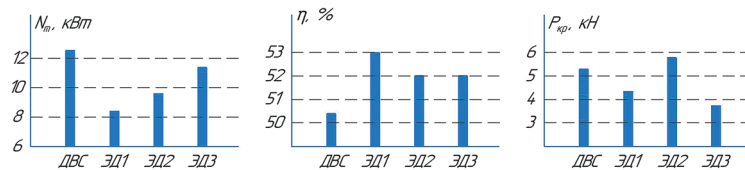


Рис. 7. Сравнение показателей трактора-прототипа с ДВС и трактора-макета с электродвигателем различной мощности (фон «Поле, подготовленное под посев»)

Fig. 7. Comparison of indicators of a prototype tractor with an internal combustion engine and a mockup tractor with an electric motor of different power characteristics ("Field prepared for sowing" background)

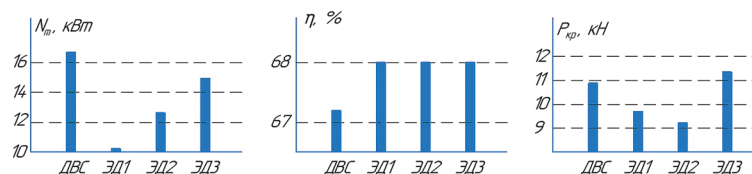


Рис. 8. Сравнение показателей трактора-прототипа с ДВС и трактора-макета с электродвигателем различной мощности (фон «Стерня»)

Fig. 8. Comparison of indicators of a prototype tractor with an internal combustion engine and a mockup tractor with an electric motor of different power characteristics ("Stubble" background)

**Выводы**

1. На базе самоходного шасси тягового класса 0,6...0,9 мощностью до 50 кВт на фоне «Поле, подготовленное под посев» трактор-макет реализует наибольший тяговый КПД с электродвигателем 15 кВт и максимальное крюковое усилие с электродвигателем 18 кВт, но максимальная тяговая мощность – у трактора-прототипа с двигателем внутреннего сгорания.

2. На фоне «Стерня» тяговый КПД для электродвигателей 15, 18 и 22 кВт является примерно одинаковым, но трактор-макет с электродвигателем мощностью 22 кВт может реализовать максимальное крюковое усилие.

3. Наиболее подходящей заменой ДВС по тяговому КПД может быть только электродвигатель мощностью 15 кВт.

**Список использованных источников**

1. Щиголов С.В., Ломакин С.Г. Влияние деформации шин на поперечную статическую устойчивость зерноуборочного комбайна // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ

**References**

1. Shchigolev S.V., Lomakin S.G. Effect of tire deformation on the transverse static stability of grain combine-harvesters. *Vestnik of*

имени В.П. Горячкина». 2017. № 5(81). С. 22-28. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2017-5-22-28> EDN: ZRIZGX

2. Baek S.-Y., Kim Y.-S., Kim W.-S., Baek S.-M., Kim Y.-J. Development and verification of a simulation model for 120 kW class electric AWD (All-Wheel-Drive) tractor during driving operation. *Energies*. 2020;13(10):2422. <https://doi.org/10.3390/en13102422>

3. Li T., Xie B., Li Z., Li J. Design and optimization of a dual-input coupling powertrain system: A case study for electric tractors. *Applied Sciences*. 2020;10(5):1608. <https://doi.org/10.3390/app10051608>

4. Melo R., Antunes F., Daher S., Vogt H., Albiero D., Tofoli F.L. Conception of an electric propulsion system for a 9 kW electric tractor suitable to family farming. *IET Electric Power Applications*. 2019;13(12):1993-2004. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0353>

5. Chen Y., Xie B., Du Y., Mao E. Powertrain parameter matching and optimal design of dual-motor driven electric tractor. *Int J Agric & Biol Eng*. 2019;12(1):33-41. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191201.3720>

6. Osinenko P.V., Geissler M., Herlitzius T. A method of optimal traction control for farm tractors with feedback of drive torque. *Biosystems Engineering*. 2015;129:20-33. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.09.009>

7. Буряев М.К., Овчинникова Н.И., Аносова А.И., Шистеев А.В. Повышение работоспособности тракторов в сельском хозяйстве // Вестник ВСГУТУ. 2015. № 6(57). С. 20-25. EDN: VCODXL

8. Савельев И.А. Модернизация двигателя трактора Т-25А // Эпоха науки. 2015. № 4. С. 45. EDN: VKMHEZ

9. Сорокин М.С., Лисиченко М.Л., Ясак В.В. Концепция развития сельскохозяйственной техники с использованием гибридного привода // Инженерия природопользования. 2016. № 2 (6). С. 25-28. EDN: XWQUNN

10. Воротников И.Л., Муравьева И.В., Петров К.А. Импортозамещение в сельскохозяйственном машиностроении России: состояние и проблемы // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 8(86). С. 52-57. EDN: VAIJTC

11. Туманова М.И., Туманов А.М., Мохаммед А.Ю.Х. Анализ мини-тракторов российского производства для использования в МФХ // Аллея Науки. 2018. № 8(24). С. 593-596. EDN: YLZAWT

12. Богаченко Д.Д., Бычкова Е.В., Кудрявцев А.В., Ладыгин А.Н., Сарач Б.М., Холин В.В. Развитие работ в области энергосберегающего частотно-регулируемого электропривода // Научной и учебно-методической школе электропривода МЭИ 80 лет: Доклады научно-методического семинара, 2 февраля 2010 г. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 12-21.

13. Ильинский Н.Ф. Вентильно-индукторный электропривод – проблемы и перспективы развития // Вентильно-индукторный электропривод: Доклады научно-практического семинара, 1 февраля 2007 г. М.: Издательство МЭИ, 2007. С. 4-13.

14. Савченко А.В., Акуленко А.Е. Методология определения КПД и эффективности использования электроэнергии автоматизированных электроприводов и автоматизированных систем управления технологическими процессами // Научный альманах. 2015. № 11-3 (13). С. 368-375. <https://doi.org/10.17117/na.2015.11.03.368>

*Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2017;5(81):22-28. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2017-5-22-28>

2. Baek S.-Y., Kim Y.-S., Kim W.-S., Baek S.-M., Kim Y.-J. Development and verification of a simulation model for 120 kW class electric AWD (All-Wheel-Drive) tractor during driving operation. *Energies*. 2020;13(10):2422. <https://doi.org/10.3390/en13102422>

3. Li T., Xie B., Li Z., Li J. Design and optimization of a dual-input coupling powertrain system: A case study for electric tractors. *Applied Sciences*. 2020;10(5):1608. <https://doi.org/10.3390/app10051608>

4. Melo R., Antunes F., Daher S., Vogt H., Albiero D., Tofoli F.L. Conception of an electric propulsion system for a 9 kW electric tractor suitable to family farming. *IET Electric Power Applications*. 2019;13(12):1993-2004. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0353>

5. Chen Y., Xie B., Du Y., Mao E. Powertrain parameter matching and optimal design of dual-motor driven electric tractor. *Int J Agric & Biol Eng*. 2019;12(1):33-41. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191201.3720>

6. Osinenko P.V., Geissler M., Herlitzius T. A method of optimal traction control for farm tractors with feedback of drive torque. *Biosystems Engineering*. 2015;129:20-33. (In Rus.) <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.09.009>

7. Buraev M.K., Ovchinnikova N.I., Anosova A.I., Shisteev A.V. Improving the performance of tractors in agriculture. *Bulletin of ES-STUM*. 2015;6(57):20-25. (In Rus.)

8. Saveliev I.A. Modernization of the mover of the T-25A tractor. *Epokha nauki*. 2015;4:45. (In Rus.)

9. Sorokin M.S., Lisichenko M.L., Yasak V.V. Concept of development of agricultural machinery with the use of hybrid-drive. *Engineering of Nature Management*. 2016;(6):25-28. (In Rus.)

10. Vorotnikov I.L., Muravieva I.V., Petrov K.A. Import substitution in agricultural machinery in Russia: state and problems. *Nauka i biznes: puti razvitiya*. 2018;8(86):52-57. (In Rus.)

11. Tumanova M.I., Tumanov A.M., Mohammed A. Yu. Kh. Analysis of Russian-made mini-tractors used on small farms. *Alleya nauki*. 2018;8(24):593-596. (In Rus.)

12. Bogachenko D.D., Bychkova E.V., Kudryavtsev A.V., Ladygin A.N., Sarach B.M., Kholin V.V. Further progress in the field of energy-saving frequency-controlled electric drive. *Nauchnoy i uchebno-metodicheskoy shkole elektroprivoda MEI 80 let: Doklady nauchno-metodicheskogo seminar, February 2, 2010*. Moscow, Izdatelstvo MEI, 2010. P. 12-21. (In Rus.)

13. Ilyinskiy N.F. Valve-inductor electric drive – problems and development prospects. *Ventilno-induktorniy elektroprivod: Doklady nauchno-prakticheskogo seminar, February 1, 2007*. Moscow, Izdatelstvo MEI, 2007. Pp. 4-13. (In Rus.)

14. Savchenko A.V., Akulenko A.E. Methodology for determining the efficiency and the energy efficiency of the automated electric drive and automation systems process control. *Science Almanac*. 2015;11-3:368-375. (In Rus.) <https://doi.org/10.17117/na.2015.11.03.368>

#### Вклад авторов

Годжаев З.А., научное руководство, развитие методологии и критический анализ представленных данных в тексте статьи.

Сенькевич С.Е., анализ предметной области и формирование начального варианта текста включая последующую доработку выводов.

Алексеев И.С., сбор и анализ данных; визуализация и подготовка данных в тексте, проведение теоретических расчетов, последующая подготовка и оформление рукописи.

Ильченко Е.Н., на основании полученных результатов, визуализация цифрового материала и подготовка начального варианта текста рукописи. Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Алексеев И.С., Ильченко Е.Н. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.03.2022; поступила после рецензирования и доработки 11.11.2022; принята к публикации 09.12.2022

#### Contribution

Z.A. Godzhaev – research supervision, methodology and critical analysis of the data presented in the manuscript.

S.E. Senkevich – formal analysis, writing – original draft of the manuscript, including the refinement of conclusions.

I.S. Alekseev – data collection and analysis; visualization and data presentation in the manuscript, theoretical analysis, design of the manuscript.

E.N. Ilchenko – visualization, writing – original draft of the manuscript

Z.A. Godzhaev, S.E. Senkevich, I.S. Alekseev, E.N. Ilchenko have the copyright to the article and are responsible for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

Received 25.06.2022; revised 11.11.2022; accepted 09.12.2022