

# МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ФРОНТАЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА

## METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE FRONT LOADER ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION

**В.А. ГОРЕЛОВ<sup>1</sup>**, д.т.н.  
**Б.Б. КОСИЦЫН<sup>2</sup>**, к.т.н.  
**А.А. СТАДУХИН<sup>2</sup>**, к.т.н.  
**О.И. ЧУДАКОВ<sup>2</sup>**, к.т.н.

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», Чебоксары, Россия,  
gvas@mail.ru

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия,  
ant.m9@yandex.ru

**V.A. GORELOV<sup>1</sup>**, Dsc in Engineering  
**B.B. KOSITSYN<sup>2</sup>**, PhD in Engineering  
**A.A. STADUKHIN<sup>2</sup>**, PhD in Engineering  
**O.I. CHUDAKOV<sup>2</sup>**, PhD in Engineering

<sup>1</sup> Chuvash State University named after Ilya N. Ulyanov,  
Cheboksary, Russia, gvas@mail.ru

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia,  
ant.m9@yandex.ru

Предлагается метод расчета тягового электродвигателя гибридной трансмиссии фронтального погрузчика. Указано, что для данных машин характерен режим работы, имеющий множество разгонов и торможений, а также чередующиеся операции с высокой и низкой требуемой силой тяги. Предложена схема электромеханической трансмиссии, которая может эффективно применяться в таких условиях.

В предложенном методе используется понятие величины диапазона электродвигателя, которую можно использовать для выбора конкретного электродвигателя, обеспечивающего требуемую подвижность машины. Для фронтального погрузчика грузоподъемностью 3500 кг максимальной скоростью 40 км/ч и максимальной удельной тягой 1 были определены основные параметры тягового электродвигателя. Однако для трансмиссии с одним фиксированным передаточным отношением (ЭМТ1) был получен электродвигатель с чрезмерно большой мощностью. Поэтому было проведено определение характеристик электродвигателя для электромеханической трансмиссии с двумя фиксированными передаточными отношениями (ЭМТ2). В процессе расчета этой трансмиссии была получена значительно меньшая необходимая мощность двигателя.

В статье проведена приблизительная оценка энергоэффективности трансмиссий ЭМТ1 и ЭМТ2. Для этого использовался метод определения КПД электродвигателя в зависимости от режима его работы (от текущей угловой скорости вала и крутящего момента). Определено, что трансмиссия ЭМТ2 обладает лучшим КПД электродвигателя как при бульдозерной операции, так и при движении на максимальной скорости.

Общий вывод заключается в том, что для рассматриваемого применения наиболее рационально применять трансмиссию с двумя фиксированными передаточными отношениями. В качестве дальнейшего направления исследования выделено применение имитационного компьютерного моделирования для оценки энергоэффективности погрузчика в цикле погрузки-разгрузки.

**Ключевые слова:** фронтальный погрузчик, тяговый расчет, тяговый электропривод, ступенчатая трансмиссия.

**Для цитирования:** Горелов В.А., Косицын Б.Б., Стадухин А.А., Чудаков О.И. Метод определения параметров электромеханической трансмиссии фронтального погрузчика // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 5. С. 38–45. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-5-38-45

A method for calculating the traction motor of a hybrid transmission of a front-end loader is proposed. It is indicated that these vehicles are characterized by a mode of operation with multiple accelerations and decelerations, as well as alternating operations with high and low required traction force. An electromechanical transmission scheme is proposed. This scheme can be effectively used in such conditions.

The proposed method uses the concept of the magnitude of the range of an electric motor, which can be used to select a specific electric motor that provides the required mobility of the vehicle. For a front loader with a lifting capacity of 3500 kg, a maximum speed of 40 km / h and a maximum specific thrust of 1, the main parameters of the traction motor were determined. However, for the transmission with one fixed gear ratio (EMT1), an electric motor with an excessively high power was obtained. Therefore, the determination of the characteristics of the electric motor for an electromechanical transmission with two fixed gear ratios (EMT2) was carried out. In the process of calculating this transmission, a significantly lower required engine power was obtained.

The article provides an approximate assessment of the energy efficiency of EMT1 and EMT2 transmissions. A method to determine the efficiency of an electric motor depending on its operating mode (on the current angular speed of the shaft and torque) was used. It was determined that the EMT2 transmission has the best efficiency of the electric motor both during bulldozing operation and when driving at maximum speed.

The general conclusion is that it is most rational to use a transmission with two fixed gear ratios. As a further direction of research, the use of computer simulation for evaluating the energy efficiency of a loader in a loading-unloading cycle is highlighted.

**Keywords:** front loader, traction calculation, traction electric drive, step transmission.

**Cite as:** Gorelov V.A., Kositsyn B.B., Stadukhin A.A., Chudakov O.I. Method for determining the parameters of the front loader electromechanical transmission. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2021. No 5, pp. 38–45 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-5-38-45

## Введение

Известно, что применение гибридных электромеханических трансмиссий (ЭМТ) на транспортных или тяговых машинах наиболее эффективно (с точки зрения топливной экономичности), когда режим работы носит переменный характер. То есть содержит множество разгонов и торможений, а также чередующиеся операции с высокой и низкой требуемой силой тяги. Классические трансмиссии (механические или гидромеханические) в таких условиях используют двигатель внутреннего сгорания неэффективно: он часто бывает недостаточно нагружен по мощности и может работать на таких частотах вращения коленчатого вала, где высок удельный расход топлива.

Фронтальные погрузчики – это распространенный класс машин, условия эксплуатации которых подразумевает как достаточно высокую максимальную скорость движения (до 45 км/ч), так и выполнение технологических операций, связанных с бульдозированием, где требуется значительная сила тяги [1]. Основным режимом работы таких машин являются циклы погрузки-разгрузки, включающие в себя разгоны, торможения, движение задним ходом, погрузку рыхлого грунта и движение с грузом. Таким образом, применение на фронтальных погрузчиках гибридной ЭМТ достаточно перспективно.

Большинство существующих в настоящее время фронтальных погрузчиков средней грузоподъемности (3,5–5 т в ковше) имеют в составе трансмиссии гидротрансформатор, коробку передач (2–4 передачи) и мосты с глав-

ными передачами и планетарными колесными редукторами [2, 3]. При этом двигатель и все агрегаты трансмиссии (кроме переднего моста) находятся в задней полураме погрузчика (рис. 1, а).

Увеличение топливной экономичности фронтального погрузчика предлагается достичь путем применения схемы ЭМТ типа «последовательный гибрид» (рис. 1, б). Тяговый электродвигатель обеспечивает подвижность машины, питаясь энергией, вырабатываемой тяговым генератором. В данной схеме двигатель внутреннего сгорания (ДВС) механически не связан с ведущими колесами и может эксплуатироваться в наиболее эффективном режиме по мощности и частоте вращения коленчатого вала. Это возможно при наличии накопителя электрической энергии, который способен принимать энергию тягового генератора, энергию рекуперативного торможения погрузчика тяговыми двигателями, а также способен выдавать энергию, необходимую для движения при недостатке мощности генератора.

Следует обратить внимание, что при бульдозировании передняя ось фронтального погрузчика может разгружаться и ее колеса не будут способны реализовывать тяговое усилие. Аналогично, при наборе ковша и движении с полностью заполненным ковшом может разгружаться задняя ось. По этой причине предлагается применять блокированную связь между передним и задним мостом, а схемы привода типа «мотор – колесо» или «мотор – мост» исключить из рассмотрения.

Очевидно, что применение ЭМТ на фрон-

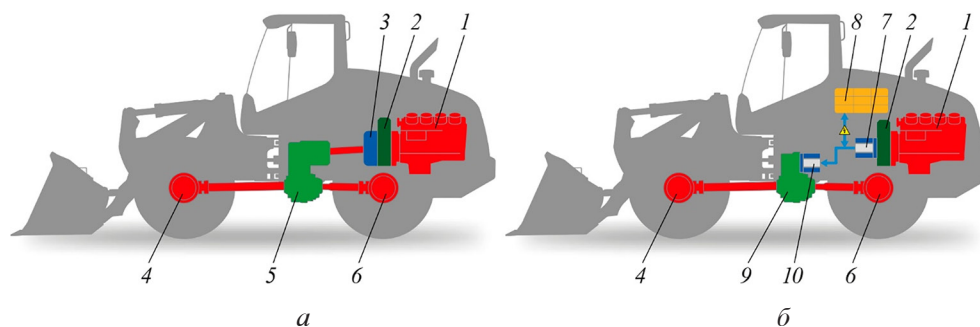


Рис. 1. Принципиальная схема трансмиссии фронтального погрузчика с гидромеханической (а) и электромеханической (б) трансмиссией:

- 1 – ДВС; 2 – коробка отбора мощности; 3 – гидротрансформатор; 4 – передний мост; 5 – коробка передач; 6 – задний мост; 7 – тяговый генератор; 8 – накопитель электрической энергии; 9 – раздаточная коробка; 10 – тяговый электродвигатель

Fig. 1. Schematic diagram of a front loader transmission with hydromechanical (a) and electromechanical (b) transmission: 1 – ICE; 2 – power take-off; 3 – hydraulic torque converter; 4 – front axle; 5 – gearbox; 6 – rear axle; 7 – traction generator; 8 – electric energy storage device; 9 – transfer case; 10 – traction motor

тальном погрузчике приведет к улучшению эксплуатационных свойств только при правильно выбранных составных частях трансмиссии – в первую очередь тяговых электродвигателей. В противном случае можно ожидать удорожание готовой машины, либо снижение тягово-динамических свойств по сравнению с существующими аналогами.

### Цель исследований

Разработка метода определения рациональных характеристик тяговых электродвигателей, работающих в составе гибридной трансмиссии фронтального погрузчика.

### Материалы и методы

*Метод определения характеристик электродвигателей гибридной трансмиссии фронтального погрузчика*

В табл. 1 представлены исходные параметры, необходимые для расчета фронтального погрузчика.

Для транспортно-технологических машин, к которым относится фронтальный погрузчик, максимальная мощность может потребоваться при достижении максимальной скорости либо при выполнении тяжелой технологической операции.

Мощность на движителе  $N_{др}$ , развиваемая при достижении максимальной скорости  $V_{max}$  на дороге с твердым покрытием, вычисляется следующим образом:

$$N_{др} = (m_{снар} \cdot g \cdot f_{др} + P_w(V_{max})) \cdot V_{max};$$

$$P_w(V) = 0,5 \cdot c_x \cdot \rho_v \cdot F_x \cdot V^2,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $f_{др}$  – коэффициент сопротивления качению колес на дороге с твердым покрытием,  $f_{др} = 0,02$ ;  $P_w(V)$  – сила сопротивления воздуха в зависимости от скорости, Н;  $V$  – скорость прямолинейного движения машины, м/с;  $\rho_v$  – плотность воздуха,  $\rho_v = 1,25 \text{ кг/м}^3$ .

В качестве тяжелого технологического режима предлагается выбрать бульдозерную операцию с рабочей скоростью  $V = 1 \text{ м/с}$  и сопротивлением движению  $f_{бд} = 0,5$  [4, 5]. Мощность  $N_{бд}$ , необходимая в этом случае, вычисляется как:

$$N_{бд} = m_{снар} \cdot g \cdot f_{бд} \cdot V_{бд}.$$

При вычислении мощности тягового электродвигателя  $N_{эд}^{треб}$ , требуемой для обеспечения рассмотренных режимов работы, следует учесть потери в механической части трансмиссии, то есть:

$$N_{эд}^{треб} = \max(N_{др}, N_{бд}) / \eta_{мт}.$$

Эксплуатируемые в настоящее время фронтальные погрузчики имеют максимальную удельную силу тяги 1–1,1, однако она обеспечивается при максимальном коэффициенте трансформации гидротрансформатора и не может поддерживаться длительное время (рис. 2).

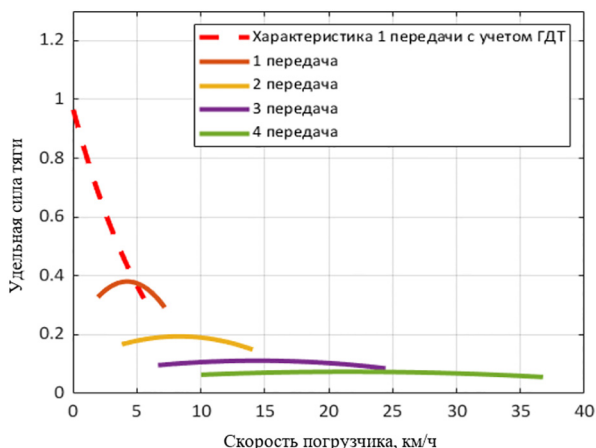
Тяговые электродвигатели (ЭД) способны некоторое время работать с крутящим моментом выше номинального (до двух раз выше), что позволит транспортной машине с ЭМТ кратковременно реализовывать большую силу тяги. Исходя из анализа тяговой характеристики

Таблица 1

#### Основные параметры, необходимые для расчета фронтального погрузчика

Table 1. The main parameters required for calculating a front loader

Параметр, обозначение, единица измерения	Значение
Масса снаряженная, $m_{снар}$ , кг	10800
Масса полная, $m$ , кг	14300
Свободный радиус колеса, $r_0$ , м	0,655
Коэффициент аэродинамического сопротивления, $c_x$	1
Площадь фронтальной проекции машины, $F_x$ , м <sup>2</sup>	5,27
КПД механической части трансмиссии, $\eta_{мт}$	0,913
Максимальная скорость машины, $V_{max}$ , м/с	11,11



**Рис. 2.** Тягово-скоростная характеристика погрузчика грузоподъемностью 3500 кг с гидромеханической трансмиссией (оценка)

*Fig. 2. Traction and speed characteristics of a loader with a lifting capacity of 3500 kg with a hydromechanical transmission (estimation)*

ки фронтального погрузчика с ГМТ на рис. 2 предлагается сформировать следующие требования к удельной тяге: в кратковременном режиме работы –  $D^{\text{крат}} = 1$ , в длительном режиме –  $D^{\text{длит}} = 0,51$  (необходимо для длительного выполнения бульдозерной операции).

Максимальные крутящие моменты  $M_{\text{эд}}^{\text{макс.крат}}$  и  $M_{\text{эд}}^{\text{макс.длит}}$ , а также максимальную угловую скорость вращения ЭД  $\omega_{\text{эд}}^{\text{макс}}$  следует находить по следующим зависимостям:

$$M_{\text{эд}}^{\text{макс.крат}} = \frac{D^{\text{крат}} \cdot m \cdot g}{i_{\text{мт}} \cdot \eta_{\text{мт}}};$$

$$M_{\text{эд}}^{\text{макс.длит}} = \frac{D^{\text{длит}} \cdot m \cdot g}{i_{\text{мт}} \cdot \eta_{\text{мт}}};$$

$$\omega_{\text{эд}}^{\text{макс}} = \frac{V_{\text{макс}}}{r_0 \cdot i_{\text{мт}}},$$

где  $i_{\text{мт}}$  – суммарное передаточное отношение механической части трансмиссии (колесный редуктор, главная передача, раздаточная коробка).

Как было показано выше, от фронтального погрузчика требуется реализовывать значительную удельную силу тяги и достаточно высокую максимальную скорость. Это значит, что входящий в состав ЭМТ тяговый ЭД должен обладать большим диапазоном. В данной статье предлагается под диапазоном ЭД понимать величину  $d_{\text{эд}}$ , получаемую делением максимального крутящего момента ЭД  $M_{\text{эд}}^{\text{макс.длит}}$  на крутящий момент при максималь-

ной мощности  $M_{\text{эд}}^{\text{мошн.длит}}$  (для определенности используются характеристики длительного режима работы):

$$d_{\text{эд}} = \frac{M_{\text{эд}}^{\text{макс.длит}}}{M_{\text{эд}}^{\text{мошн.длит}}}.$$

Если считать моментную скоростную характеристику ЭД близкой к кривой постоянной мощности, то можно записать:

$$M_{\text{эд}}^{\text{мошн.длит}} = \frac{N_{\text{эд}}^{\text{длит}}}{\omega_{\text{эд}}^{\text{макс}}}; \quad d_{\text{эд}} = \frac{M_{\text{эд}}^{\text{макс.длит}} \cdot \omega_{\text{эд}}^{\text{макс}}}{N_{\text{эд}}^{\text{длит}}},$$

где  $N_{\text{эд}}^{\text{длит}}$  – требуемая мощность тягового ЭД с учетом обеспечиваемого диапазона.

И окончательно:

$$N_{\text{эд}}^{\text{длит}} = \frac{M_{\text{эд}}^{\text{макс.длит}} \cdot \omega_{\text{эд}}^{\text{макс}}}{d_{\text{эд}}}.$$

Видно, что чем больше диапазон ЭД, тем меньше его требуемая мощность. Существующие тяговые электромашины, используемые на транспортных средствах, имеют приблизительное значение  $d_{\text{эд}} = 2,5$ . Используя данную величину, можно определять мощность при выборе конкретного электродвигателя.

Как известно, электродвигатели обладают различной эффективностью преобразования энергии из электрической в механическую в зависимости от режима работы. Чем больше режим работы отличается от номинальной частоты вращения вала и номинальной мощности, тем меньше КПД электродвигателя. Для оценки энергоэффективности работы фронтального погрузчика с ЭМТ в дальнейшем предлагается воспользоваться методом определения мощности потерь электродвигателя, представленной в работе [6]. Таким образом, путем задания максимальной мощности, момента и угловой скорости вала ЭД можно оценить потери мощности при текущей угловой скорости и развиваемом крутящем моменте. Метод основан на аппроксимации массива данных по существующим синхронным машинам с постоянными магнитами, применяемым на транспортных средствах.

## Результаты и обсуждение

С использованием представленного метода для погрузчика, основные параметры которого приведены в табл. 1, была получена следующая тягово-скоростная характеристика (рис. 3).



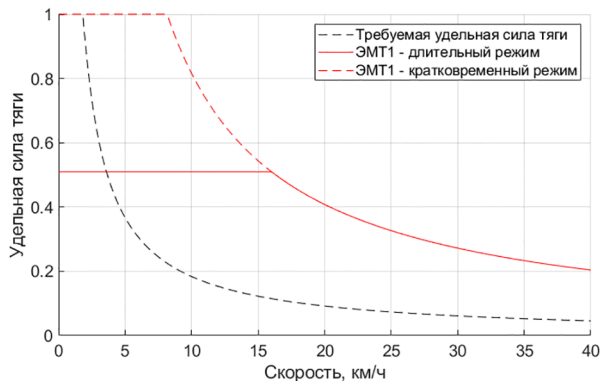


Рис. 3. Тягово-скоростная характеристика погрузчика с ЭМТ

Fig. 3. Traction and speed characteristics of a loader with electromechanical transmission

В табл. 2 представлены основные результаты проведенного расчета. Следует обратить внимание на чрезмерно большое значение мощности –  $N_{эд}^{длит} = 348,2$  кВт. То есть электродвигатель, обеспечивающий требуемую подвижность фронтального погрузчика, будет обладать значительными габаритами, весом и стоимостью.

В данном случае следует пойти на некоторое усложнение конструкции: она будет иметь два фиксированных передаточных отношения. Для дальнейшего расчета примем, что скорость, обеспечиваемая на низшей передаче (на той же, где обеспечивается техноло-

гический режим), должна составлять не менее 20 км/ч [7]. В таком случае может отсутствовать необходимость переключать передачи на ходу, что упростит конструкцию трансмиссии. Результаты расчета ЭМТ с двумя передаточными отношениями представлены на рис. 4 и в табл. 3.

Результаты расчета показывают, что в случае применения двух переменных передаточных числе трансмиссии требуется ЭД с меньшим диапазоном либо с меньшей мощностью.

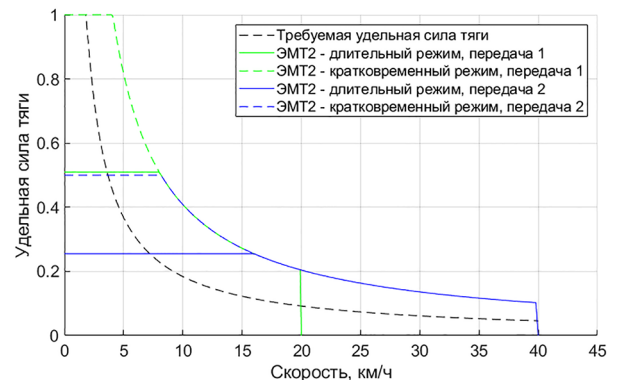


Рис. 4. Тягово-скоростная характеристика погрузчика с ЭМТ с двумя фиксированными передаточными числами

Fig. 4. Traction-speed characteristic of a loader with electromechanical transmission with two fixed gear ratios

Таблица 2

Результаты расчета ЭМТ погрузчика

Table 2. The results of calculating the electromechanical transmission of the loader

Параметр, обозначение, единица измерения	Значение
Мощность для обеспечения максимальной скорости, $N_{др}$ , кВт	32,57
Мощность для обеспечения максимальной скорости, $N_{бд}$ , кВт	71,52
Мощность ЭД, необходимая для обеспечения основных режимов работы погрузчика, $N_{эд}^{треб}$ , кВт	78,34
Передаточное отношение трансмиссии, $i_{мт}$	69
Требуемый диапазон электродвигателя $d_{эд}$ мощностью $N_{эд}^{треб}$	11,11
Мощность ЭД $N_{эд}^{длит}$ , необходимая для обеспечения диапазона $d_{эд} = 2,5$ , кВт	348,2
Максимальный момент ЭД в кратковременном режиме, $M_{эд}^{макс.крат}$ , Нм	2915
Максимальный момент ЭД в длительном режиме, $M_{эд}^{макс.длит}$ , Нм	1487
Максимальная угловая скорость вала ЭД, $\omega_{эд}^{макс}$ , 1/с	585,5

Таблица 3

Результаты расчета ЭМТ погрузчика с двумя фиксированными передаточными числами

Table 3. The results of calculating the electromechanical transmission of a loader with two fixed gear ratios

Параметр, обозначение, единица измерения	Значение
Передаточное отношение трансмиссии, $i_{\text{мг}}$	69; 34,5
Требуемый диапазон электродвигателя $d_{\text{эд}}$ мощностью $N_{\text{эд}}^{\text{треб}}$	5,56
Мощность ЭД $N_{\text{эд}}^{\text{длит}}$ , необходимая для обеспечения диапазона $d_{\text{эд}} = 2,5$ , кВт	174

Далее, с использованием метода, представленного в работе [6] выполнено сравнение КПД ЭД при работе на требуемой тягово-скоростной характеристике для трансмиссии с одним фиксированным передаточным отношением (ЭМТ1) и с двумя (ЭМТ2). Зависимость КПД ЭД представлена на рис. 5.

Анализ графиков позволяет судить о том, что и при выполнении технологических операций,

и при передвижения в транспортном режиме целесообразно использовать ЭМТ с двумя передаточными отношениями по причине лучшего КПД ЭД. При скоростях менее 20 км/ч в трансмиссии ЭМТ2 целесообразно использовать высшую передачу, если это допускается требуемой силой тяги. В табл. 4 приведены КПД ЭД для рассмотренных в методе выбора характеристик ЭД режимов движения погрузчика.

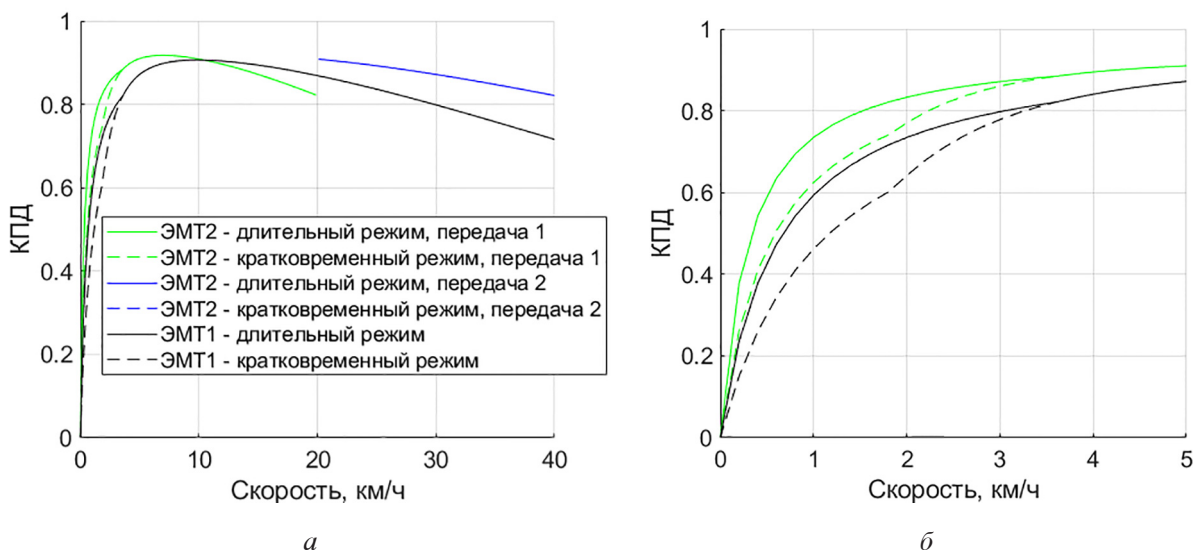


Рис. 5. КПД электродвигателя для ЭМТ погрузчика с одним и двумя передаточными отношениями (а), КПД укрупненно для малых скоростей движения (б)

Fig. 5. Efficiency of the electric motor for the electromechanical transmission of a loader with one and two gear ratios (a), the efficiency is enlarged for low speeds of movement (b)

Таблица 4

Результаты расчета КПД электродвигателя для разных типов ЭМТ

Table 4. Results of calculating the efficiency of an electric motor for different types of electromechanical transmission

Тип электромеханической трансмиссии	ЭМТ1	ЭМТ2
КПД ЭД при выполнении бульдозерной операции:		
кратковременный режим	0,463	0,626
длительный режим	0,595	0,736
КПД ЭД при максимальной скорости	0,716	0,821

## Заключение

Представленный в статье метод позволяет в рамках проектировочного расчета ЭМТ фронтального погрузчика определить максимальную мощность тягового электродвигателя, максимальную угловую скорость его вала, а также требуемые значения максимального крутящего момента в кратковременном и длительном режимах работы. В методе используется понятие величины диапазона электродвигателя, которую можно использовать для выбора конкретного ЭД, обеспечивающего требуемую подвижность машины.

Для фронтального погрузчика грузоподъемностью 3500 кг, максимальной скоростью 40 км/ч и удельной тягой 1 были определены основные параметры тягового электродвигателя для трансмиссии с одним фиксированным передаточным отношением. По результатам расчета в этом случае требуется либо ЭД с диапазоном 11,11, либо ЭД мощностью 348,2 кВт, что способно свести на нет возможные преимущества фронтального погрузчика с ЭМТ.

Рациональным решением здесь является применение ЭМТ с двумя фиксированными передаточными отношениями. В процессе расчета этой трансмиссии была получена необходимая мощность двигателя – 174 кВт.

В статье проведена приблизительная оценка КПД ЭД при работе в ЭМТ с одним (ЭМТ1) и с двумя (ЭМТ2) фиксированными передаточными отношениями. Выяснено, что в ЭМТ с двумя передаточными числами ЭД работает более эффективно. Так, в режиме бульдозерной операции (удельная тяга 0,51, скорость 1 м/с) для ЭМТ1 КПД – 0,595, для ЭМТ2 КПД – 0,736.

Очевидно, рассмотренные в статье режимы не являются единственно возможными для фронтального погрузчика. Например, применение ЭМТ может дать значительные преимущества при выполнении короткого и длинного цикла погрузки-разгрузки в случае наличия электрического накопителя [8]. Для исследования энергоэффективности фронтального погрузчика в указанных режимах работы необходимо использовать имитационное компьютерное моделирование, что видится дальнейшим направлением работ по данной теме.

Исследования выполнены ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» по договору № 517-21 от 22 апреля 2021 г. при финансовой поддерж-

ке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по теме «Создание высокотехнологичного импортозамещающего производства семейства фронтальных погрузчиков с гибридным электроприводом» (соглашение № 075-11-2021-051 от 24 июня 2021 г.).

## Литература

1. Лукашук О.А., Комиссаров А.П., Летнев К.Ю. Машины для разработки грунтов. Проектирование и расчет: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 128 с.
2. Filla R. Alternative System Solutions for Wheel Loaders and Other Construction Equipment // 1st CTI Forum Alternative, Electric and Hybrid Drive Trains. Berlin, Germany, 2008.
3. Пугин К.Г., Бургонутдинов А.М. Машины для строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог. Ч. 1. Дорожные катки и одноковшовые погрузчики: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. 172 с.
4. Gottschalk M., Jacobs G. and Kramer A. Test Method for Evaluating the Energy Efficiency of Wheel Loaders // ATZ offhighway worldwide. 2018, № 1, pp. 44–49. DOI: 10.1007/s41321-018-0008-0
5. Белоногов Л.Б., Озеров А.В., Гришкевич А.С., Янковский Л.В. Одноковшовые погрузчики: учеб.-метод. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. 155 с.
6. Падалкин Б.В., Иваненков В.В., Косицын Б.Б., Стадучин А.А., Балковский К.С. Метод оценки эффективности применения электромеханических трансмиссий транспортных средств на этапе проектирования // Известия МГТУ «МАМИ». М., 2020. Вып. № 2 (44). С. 58–67 DOI: 10.31992/2074-0530-2020-44-2-58-68
7. Uebel K., Raduenz H., Krus. P., and Negri V. Design Optimisation Strategies for a Hydraulic Hybrid Wheel Loader // Proceedings of the BATH/ASME 2018 Symposium on Fluid Power and Motion Control. Bath, UK. September 12–14, 2018. V001T01A001. ASME. DOI: 10.1115/FPMC2018-8802
8. Stein G., Froberg A., Martinsson J., Brattberg B., Filla R. and Unnebdck J. Fuel efficiency in construction equipment – optimize the machine as one system // AVL International Commercial Powertrain Conference, 2013. DOI: 10.13140/RG.2.1.2031.4089

## References

1. Lukashuk O.A., Komissarov A.P., Letnev K.Yu. Mashiny dlya razrabotki gruntov. Proyektirovaniye i raschet: uchebnoye posobiye [Soil excavation ma-

- chinery. Design and calculation: tutorial]. Yekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta Publ., 2018. 128 p.
2. Filla R. Alternative System Solutions for Wheel Loaders and Other Construction Equipment // 1st CTI Forum Alternative, Electric and Hybrid Drive Trains. Berlin, Germany, 2008.
  3. Pugin K.G., Burgonutdinov A.M. Mashiny dlya stroitel'stva, remonta i sodержaniya avtomobil'nykh dorog. CH. 1. Dorozhnyye katki i odnokovshovyye pogruzchiki: ucheb. posobiye [Machinery for the construction, repair and maintenance of highways. Part 1. Road rollers and single-bucket loaders: textbook]. Perm': Izd-vo Perm. nats. issled. poli-tekhn. un-ta Publ., 2011. 172 p.
  4. Gottschalk M., Jacobs G. and Kramer A. Test Method for Evaluating the Energy Efficiency of Wheel Loaders // ATZ offhighway worldwide. 2018, № 1, pp. 44–49. DOI: 10.1007/s41321-018-0008-0
  5. Belonogov L.B., Ozerov A.V., Grishkevich A.S., Yankovskiy L.V. Odnokovshovyye pogruzchiki: ucheb.-metod. Posobiye [Single-bucket loaders: training manual]. Perm': Izd-vo Perm. nats. issled. politekhn. un-ta Publ., 2015. 155 p.
  6. Padalkin B.V., Ivanenkov V.V., Kositsyn B.B., Stadukhin A.A., Balkovskiy K.S. Method for assessing the effectiveness of the use of electromechanical transmissions of vehicles at the design stage. Izvestiya MGTU «MAMI». 2020. No 2 (44), pp. 58–67 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2020-44-2-58-68
  7. Uebel K., Raduenz H., Krus. P., and Negri V. Design Optimisation Strategies for a Hydraulic Hybrid Wheel Loader // Proceedings of the BATH/ASME 2018 Symposium on Fluid Power and Motion Control. Bath, UK. September 12–14, 2018. V001T01A001. ASME. DOI: 10.1115/FPMC2018-8802
  8. Stein G., Froberg A., Martinsson J., Brattberg B., Filla R. and Unnebdck J. Fuel efficiency in construction equipment – optimize the machine as one system // AVL International Commercial Powertrain Conference, 2013. DOI: 10.13140/RG.2.1.2031.4089