



# МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 629.33; 621.3

С.Н. ПОДДУБКО, канд. техн. наук, доц.  
генеральный директор<sup>1</sup>  
E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

Н.Н. ИШИН, д-р техн. наук, доц.  
начальник НТЦ «Карьерная техника»<sup>1</sup>  
E-mail: nik\_ishin@mail.ru

А.М. ГОМАН, канд. техн. наук, доц.  
начальник отдела динамического анализа и вибродиагностики машин<sup>1</sup>  
E-mail: ark.goman@gmail.com

А.С. СКОРОХОДОВ, канд. техн. наук  
ведущий научный сотрудник отдела динамического анализа и вибродиагностики машин<sup>1</sup>  
E-mail: skanst@yandex.ru

В.В. ШПОРТЬКО, магистр физ.-мат. наук  
научный сотрудник отдела динамического анализа и вибродиагностики машин<sup>1</sup>  
E-mail: llii7pot@yandex.ru

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 11.06.2021.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ В СИЛОВЫХ УСТАНОВКАХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

*При всех своих преимуществах электрические транспортные средства обладают существенным недостатком — относительно небольшим по сравнению с автомобилями, использующими углеводородное топливо, запасом хода на одной зарядке тяговой батареи. Решение проблемы состоит в выборе рациональной структурной схемы электромеханической силовой установки для получения высокой ее энергоэффективности независимо от условий эксплуатации. Значительное число выпускаемых сегодня электромобилей либо не содержат коробок передач, либо содержат односкоростные редукторы. Применение многоскоростной коробки передач решает задачу адаптации рабочих процессов тягового электродвигателя к нагрузочным условиям, максимально приближая его КПД к диапазону высокоэффективных значений. В работе выполнена расчетная оценка затрат энергии развозного грузового электромотоцикла МАЗ-4381ЕЕ для различных вариантов исполнения механической части силовой установки: без редуктора, с использованием редуктора и двух видов двухскоростных коробок передач (вальной и вально-планетарной). Оценка произведена на основе рассмотрения европейского испытательного ездового цикла NEDC с учетом использования карт КПД тягового асинхронного электродвигателя. Результаты расчета показали, что применение двухскоростных коробок передач позволяет уменьшить более чем в 1,8 раза общее потребление энергии по сравнению с силовой установкой с высокомоментным двигателем и без редуктора.*

**Ключевые слова:** *грузовой электромобиль, запас хода, энергоэффективность, силовая установка, аккумуляторная батарея, тяговый электродвигатель, карта КПД, коробка передач, передаточное число*

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-5-12>

**Введение.** Электромобили в настоящее время являются наиболее прогрессивной альтернативой автомобилям, использующим углеводородное топливо. Несмотря на их очевидные преимущества, одним из основных недостатков является ограниченная дальность движения, которая существенно зависит от условий эксплуатации и климатических условий [1, 2]. Особенно остро стоит эта проблема при проектировании грузового электрического транспорта. В работе [3] проводится обоснование рациональных параметров силовой установки развозного грузового электромобиля на базе автомобиля МАЗ, к которым относятся мощность электрической машины, ее механическая характеристика, массо-энергетические и экономические показатели накопителя энергии, передаточное число редуктора. Показано, что увеличение запаса хода приводит к существенному снижению грузоподъемности электрогрузовиков. Еще одной проблемой при этом является значительное время зарядки тяговых батарей даже при использовании зарядных устройств большой мощности.

Метод расчета, позволяющий определять расход энергии аккумуляторной батареи в зависимости от основных технических параметров электромобиля, дорожных условий и процессов рекуперации механической энергии в электрическую при торможении, рассмотрен в работе [4]. В ней также разработана методика оценки запаса хода электромобиля на одной зарядке аккумуляторной батареи на основе рассмотрения общепринятых в мировой практике испытательных ездовых циклов: европейского NEDC, американских EPA (городского FTP-75 и загородного HWFET), японского JC08, мирового WLTC. Приводятся примеры расчета запаса хода электромобилей ведущих мировых производителей, выполнена оценка влияния эксплуатационных факторов (масса автомобиля, дорожные условия движения, эффективность процессов преобразования энергии в силовой установке) на его величину. Предложенная методика позволяет производить расчетное тестирование основных паспортных данных электромобилей: запас хода на одной зарядке, емкость аккумуляторной батареи.

К недостаткам предложенной методики следует отнести использование в ней осредненных энергетических параметров, таких как КПД тягового электродвигателя  $\eta_{эд}$ , КПД рекуперации энергии электродвигателем в генераторном режиме  $\eta_{рек}$ . Эти параметры зависят от значений частот вращения вала электродвигателя и его крутящих моментов, а следовательно, существенно влияют на точность расчета энергетических затрат тяговой аккумуляторной батареи. Кроме того, расчеты были произведены для безредукторной силовой установки.

Поэтому актуальность решаемой проблемы заключается в необходимости адаптации структурной схемы электромеханической сило-

вой установки для получения ее высокой энергоэффективности независимо от условий эксплуатации, что в свою очередь позволит снизить энергопотребление без увеличения массы аккумуляторной батареи.

Применение многоскоростных коробок передач в электромеханических силовых установках электромобилей позволит адаптировать рабочие параметры тягового электродвигателя к нагрузочным условиям, максимально приближая его КПД к диапазону высокоэффективных значений. Особенно значительный эффект снижения энергопотребления автотранспортного средства достигается в городских условиях эксплуатации.

В настоящее время многие мировые производители автомобилей (компании Tesla Inc., Daimler AG и др.) стараются найти различные способы, которые помогли бы увеличить запас хода на одной зарядке, то есть решить задачу повышения энергоэффективности электромобилей. С этой целью производители используют различные варианты конструкций тяговых электродвигателей, коробок передач, систем управления.

Необходимость применения в силовых установках электрогрузовиков двухскоростных коробок передач обоснована в работе [5]. Это связано с тем, что односкоростные редукторы затрудняют одновременную реализацию двух задаваемых техническими условиями параметров эффективности электромобиля: динамического фактора [6], характеризующего его тягово-скоростные свойства, и максимальной скорости движения.

При этом обеспечение величины динамического фактора можно осуществить либо значительным по величине крутящим моментом двигателя на низких оборотах, либо посредством введения понижающей передачи, имеющей достаточно большое значение передаточного числа [6]. Наличие понижающей передачи приводит к улучшению массо-габаритных и стоимостных параметров силовой установки, поскольку позволяет отказаться от двигателя с большим максимальным крутящим моментом на низких оборотах и использовать вместо него тяговый электродвигатель меньшей мощности [7]. При этом для реализации максимальной скорости движения требуется еще одна передача с меньшим передаточным отношением.

Определенные шаги в этом направлении сделаны многими исследователями в Великобритании, Германии, Италии, Финляндии, Польше, России [1, 2, 8–12].

*Целью данной работы* является создание уточненного метода расчетной оценки энергозатрат электрических транспортных средств на движение для различных вариантов исполнения механической части их силовой установки. Оценка запаса хода на одной зарядке производится на основе рассмотрения европейского испытательного ездового цикла NEDC [13] и использования

карт КПД тягового электродвигателя. Объектом исследования служит развозной электромобиль МАЗ-4381ЕЕ.

**Карты КПД тягового асинхронного электродвигателя грузового электромобиля МАЗ-4381ЕЕ.** В работе [5] приведены технические характеристики асинхронного электродвигателя ТАЕМ-130W, разработанного в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси для грузового электромобиля МАЗ-4381ЕЕ:

- номинальная мощность — 130 кВт;
- максимальное число оборотов — 9000 мин<sup>-1</sup>;
- номинальный момент в диапазоне частот вращения вала двигателя 0 < n < 3000 мин<sup>-1</sup> — 414 Н·м;
- масса электродвигателя — 252 кг.

Карты КПД двигателя в диапазоне 0 < n < 9000 мин<sup>-1</sup> показаны в плоскостях: частота вращения вала n — крутящий момент M<sub>эд</sub> (рисунок 1 а); частота вращения n — мощность двигателя N<sub>эд</sub> (см. рисунок 1 б).

Данные по картам КПД предоставлены НИЦ «Электромеханические и гибридные силовые установки мобильных машин».

На рисунках 1 а, б зоны, расположенные выше графиков, соответствующих номинальной мощности, характеризуют перегрузочную способность двигателя.

Как видно из этих рисунков, наиболее эффективная зона КПД, в пределах которой должен варьироваться крутящий момент нагрузки, заклю-

чается в интервале от 50 до 100 % номинального значения момента. При этом частота вращения вала электродвигателя должна быть не менее 2000 мин<sup>-1</sup>. При меньшей частоте вращения практически во всем диапазоне изменения величины крутящего момента эффективность работы двигателя резко снижается.

В зоне низкой эффективности скорость электромобиля v (км/ч) изменяется в пределах

$$0 \leq v \leq \frac{3,6 \cdot 2000 \cdot r_k}{9,55 u_{кп} u_{гп}}, \quad (1)$$

где r<sub>к</sub> — радиус колеса; u<sub>кп</sub> — передаточное число коробки передач; u<sub>гп</sub> — передаточное число главной передачи.

Для случая отсутствия коробки передач (u<sub>кп</sub> = 1) в электрогрузовике МАЗ-4381ЕЕ и значениях параметров u<sub>гп</sub> = 3,2; r<sub>к</sub> = 0,392 м формула (1) дает следующее граничное значение скорости v\*, соответствующее зоне пониженных значений КПД электродвигателя:

$$v^* = \frac{3,6 \cdot 2000 \cdot 0,392}{9,55 \cdot 1 \cdot 3,2} = 92,4 \text{ км/ч.}$$

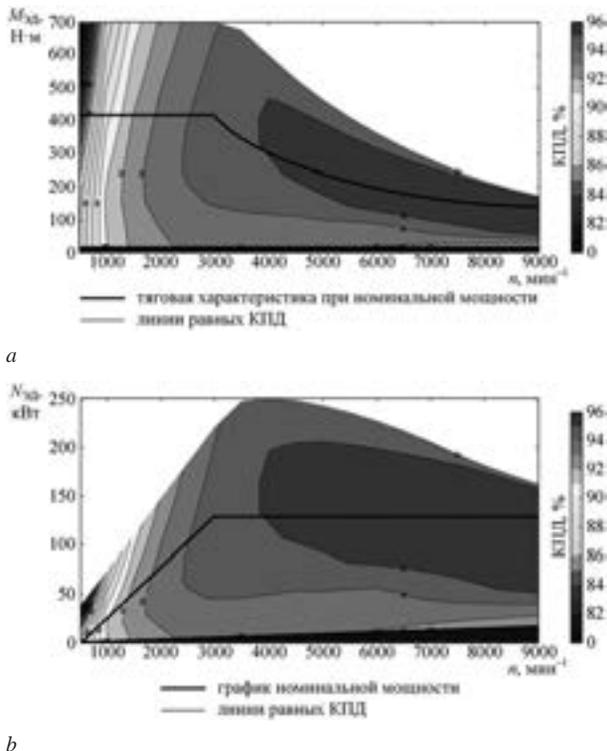
Таким образом, без коробки передач в городских условиях эксплуатации, которые характеризуются относительно низкой скоростью движения и частым режимом разгона, электродвигатель грузового электромобиля будет работать в зоне низкого КПД, неэффективно используя энергию аккумуляторной батареи.

В случае применения в силовом электроприводе электрогрузовика односкоростного понижающего редуктора его передаточное число u<sub>р</sub> определяется из кинематического критерия — достижения максимальной скорости v<sub>max</sub> = 90 км/ч (25 м/с) при частоте вращения вала электродвигателя n<sub>max</sub> = 9000 мин<sup>-1</sup> [5]. Величина передаточного числа u<sub>р</sub> равна 4,62. В соответствии с формулой (1) граничное значение скорости движения электромобиля в зоне пониженных значений КПД равно v<sub>р</sub>\* = 20 км/ч.

Согласно ГОСТ Р 52280-2004 [14] максимальный подъем, преодолеваемый автомобилем полной массой при движении по сухому, твердому и ровному покрытию на низшей передаче, должен составлять не менее 25 % (14,04°). Поэтому в случае применения в силовом электроприводе односкоростного редуктора необходимо повышать величину номинального момента тягового электродвигателя не менее, чем в два раза [5]. Это приведет к существенному увеличению его массо-габаритных параметров и ухудшению эффективности работы.

Таким образом, возникает необходимость использования в силовой установке электрогрузовика МАЗ-4381ЕЕ коробки как минимум с двумя передачами.

**Расчет затрат энергии аккумуляторной батареи развозного грузового электромобиля**



**Рисунок 1 — Карты КПД асинхронного двигателя в плоскостях: а — частота вращения — крутящий момент; б — частота вращения — мощность**  
**Figure 1 — Efficiency maps of an asynchronous motor in the planes: a — speed of rotation — torque; b — speed of rotation — power**

**МАЗ-4381ЕЕ для различных вариантов исполнения механической части силовой установки.**

С использованием предложенной методики [4] выполнена расчетная оценка затрат энергии развозного электромобиля МАЗ-4381ЕЕ для следующих вариантов: без редуктора, с применением редуктора и двух видов двухскоростных коробок передач (вальной и вально-планетарной). Сравнительная оценка проведена на основе рассмотрения европейского испытательного ездового цикла NEDC с учетом использования карт КПД тягового асинхронного электродвигателя.

Расчеты энергозатрат производятся для следующих значений параметров: полная масса автомобиля  $m_a = 12\ 000$  кг; максимальная скорость движения  $v_{max} = 90$  км/ч; коэффициент сопротивления качению  $f = 0,01$ ; радиус колеса  $r_k = 0,392$  м; лобовая площадь автомобиля  $F_a = 7,94$  м<sup>2</sup>; коэффициент сопротивления воздуха  $k_b = 0,6$  Н·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>; КПД инвертора  $\eta_{и} = 0,99$ ; КПД аккумуляторной батареи  $\eta_{АКБ} = 0,90$ .

Для варианта с вальной коробкой передаточное число главной передачи (ведущего моста)  $u_{гл(в)} = 4,62$ ; передаточные числа коробки передач —  $u_{кп1(в)} = 5,1$ ;  $u_{кп2(в)} = 3,207$ . Для варианта с вально-планетарной коробкой —  $u_{гл(вп)} = 3,2$ ;  $u_{кп1(вп)} = 7,48$ ;  $u_{кп2(вп)} = 4,32$ .

Кинематические схемы коробок передач рассмотрены в работе [5].

Коэффициент учета вращающихся масс электромобиля рассчитывается по формуле

$$\delta_{вр} = 1 + \frac{J_{эд} (u_{кп} u_{гл})^2 \eta_m + J_k}{m_a r_k^2},$$

где  $J_{эд}$  — момент инерции вращающихся частей электродвигателя (ротор ЭД), кг·м<sup>2</sup>;  $\eta_m = \eta_{кп} \eta_{кв} \eta_{гл} \eta_{л}$  — КПД механической части силовой установки (трансмиссии), где  $\eta_{кп}$ ,  $\eta_{кв}$ ,  $\eta_{гл}$ ,  $\eta_{л}$  — КПД коробки передач или редуктора, карданного вала, главной передачи и дифференциала соответственно;  $J_k$  — суммарный момент инерции всех колес автомобиля, кг·м<sup>2</sup>.

Принимаются значения  $J_{эд} = 0,5$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_k = 4 \cdot 3 = 12$  кг·м<sup>2</sup>;  $\eta_{кп} = 0,99$ ;  $\eta_{кв} = 0,98$ ;  $\eta_{гл} = 0,98$ ;  $\eta_{л} = 0,97$ . При отсутствии коробки передач или редуктора  $\eta_{кп} = 1$ .

Величины коэффициента вращающихся масс  $\delta_{вр}$  приведены в таблице 1.

Сила тяги  $F_T$  электромобиля рассчитывается по формуле

$$F_T = f m_a g + \delta_{вр} m_a j + k_b F_a v^2, \tag{2}$$

где  $g = 9,81$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $j$  — ускорение автомобиля, м/с<sup>2</sup>;  $v$  — скорость движения автомобиля, м/с.

Параметры работы электродвигателя  $n_{эд}$  (мин<sup>-1</sup>) и  $M_{эд}$  (Н·м) при заданных скорости движения автомобиля  $v$  и силе тяги  $F_T$  вычисляются по формулам:

$$n_{эд} = 9,55 \frac{u_{кп} u_{гл}}{r_k} v; \tag{3}$$

$$M_{эд} = \frac{F_T r_k}{u_{кп} u_{гл} \eta_m}. \tag{4}$$

В связи с тем, что скорость движения электрогрузовика МАЗ-4381ЕЕ не превышает 90 км/ч, расчетные значения расходуемой  $E_{расх}$ , рекуперированной  $E_{рек}$  энергии и общих затрат  $E_{затр}$  энергии аккумуляторной батареи при различных вариантах механической части силовой установки приведены в таблице 2 только для городского цикла NEDC. Варианты 1 и 5 соответствуют безредукторной силовой установке; варианты 2, 3, 6, 7 — движению электромобиля на одной передаче;

**Таблица 1 — Расчетные значения коэффициента вращающихся масс  $\delta_{вр}$**   
**Table 1 — Calculated values of the coefficient of rotating masses  $\delta_{вр}$**

Коробка передач	$u_{гл}$	$u_{кп}$	$\eta_m$	$\delta_{вр}$
Вальная	4,62	—	0,9316	1,012
Вальная	4,62	5,1	0,9223	1,145
Вальная	4,62	3,207	0,9223	1,061
Вально-планетарная	3,2	—	0,9316	1,009
Вально-планетарная	3,2	7,48	0,9223	1,150
Вально-планетарная	3,2	4,32	0,9223	1,054

**Таблица 2 — Расчетные значения расходуемой, рекуперированной энергии и общих затрат энергии аккумуляторной батареи**  
**Table 2 — Calculated values of the consumed, recuperated energy and total energy consumption of the battery**

Номер варианта	$u_{гл}$	$u_{кп}$	$\eta_m$	$\eta_{эд}$	$E_{расх}$ , кВт·ч	$E_{рек}$ , кВт·ч	$E_{затр}$ , кВт·ч
1	4,62	—	0,9316	0,6	1,56620	0,19823	1,36797
2	4,62	5,1	0,9223	карта	1,08620	0,35584	0,73036
3	4,62	3,207	0,9223	карта	1,04823	0,32100	0,72723
4	4,62	5,1	0,9223	карта	1,05276	0,33224	0,72052
5	3,2	—	0,9316	0,5	1,87651	0,16463	1,71188
6	3,2	7,48	0,9223	карта	1,08853	0,35759	0,73094
7	3,2	4,32	0,9223	карта	1,04966	0,31775	0,73191
8	3,2	7,48	0,9223	карта	1,05072	0,33064	0,72008

варианты 4, 8 — движению с переключением передач.

Методика расчета затрат энергии заключается в следующем. По выражению (2) определяется сила тяги электромобиля в соответствии со скоростным профилем движения. Далее по формулам (3), (4) рассчитываются соответствующие

значения частоты вращения вала электродвигателя и его крутящего момента. С использованием карты КПД электродвигателя (см. рисунок 1 а) для каждой пары значений  $(n_{эд,i}; M_{эд,i})$  определяется величина КПД  $\eta_{эд,i}$ . Для безредукторной силовой установки (варианты 1 и 5) согласно расположению на карте КПД значений  $(n_{эд,i}; M_{эд,i})$  принимаются осредненные значения  $\eta_{эд,i}$ , равные 0,6 и 0,5 соответственно при  $u_{кп1(в)} = 4,62$  и  $u_{кп2(в)} = 3,2$ . На рисунке 2 показаны карты КПД с нанесенными на них значениями  $(n_{эд,i}; M_{эд,i})$  для вальной коробки передач (варианты 1–4). Верхние части рисунков относятся к разгону и равномерному движению электромобиля, нижние — к процессу торможения. Далее в соответствии с изложенной в [4] методикой проводится расчет расходуемой при разгоне и равномерном движении энергии  $E_{расх}$ , рекуперированной при тор-

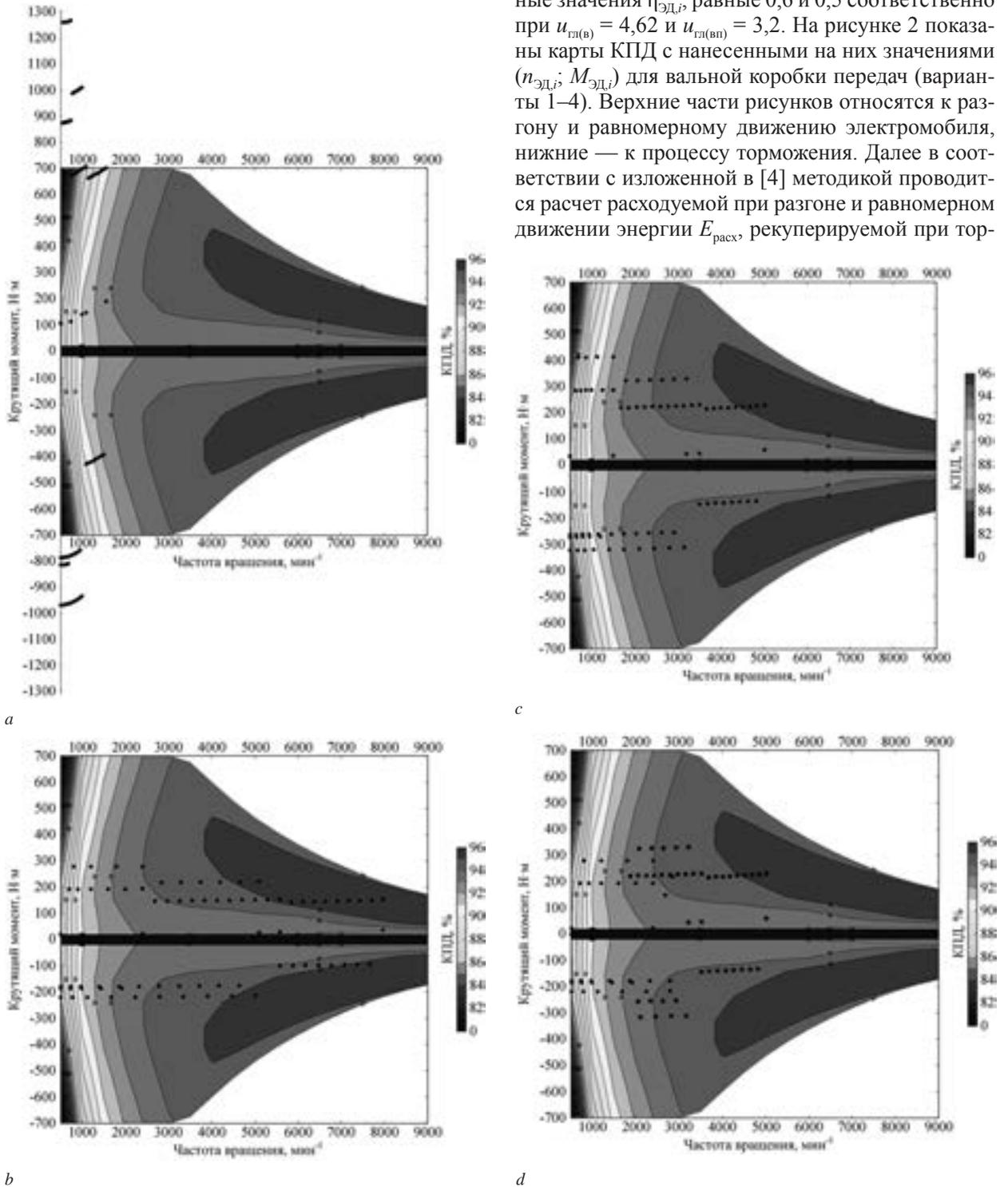


Рисунок 2 — Карты КПД вальной коробки передач с нанесенными на нее значениями  $(n_{эд,i}; M_{эд,i})$ : а — вариант № 1 для безредукторной силовой установки; б — вариант № 2 для нижней передачи  $u_{кп1(в)} = 5,1$ ; с — вариант № 3 для высшей передачи  $u_{кп2(в)} = 3,207$ ; д — вариант № 4 с переключением передач  
 Figure 2 — Efficiency maps of the shaft gearbox with the values  $(n_{эд,i}; M_{эд,i})$  plotted on it: а — option no. 1 for the gearless power unit; б — option no. 2 for the low gear  $u_{кп1(в)} = 5.1$ ; с — option no. 3 for the high gear  $u_{кп2(в)} = 3.207$ ; д — option no. 4 with gear shifting

мождении энергии  $E_{\text{рек}}$  и общих затрат энергии аккумулятора  $E_{\text{затр}}$ .

Анализ карт КПД показывает, что при безредукторной силовой установке с передаточным числом главной передачи  $u_{\text{гл(в)}} = 4,62$  (см. рисунок 2 а) необходимо использовать электродвигатель с величиной номинального крутящего момента  $M_{\text{эдн}} = 1267 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , что в 3 раза превышает значение номинального крутящего момента  $M_{\text{эдн}} = 414 \text{ Н}\cdot\text{м}$  в случае применения коробки передач. Для реализации такого режима движения во столько же раз должны быть увеличены массо-габаритные параметры двигателя при сохранении той же мощности. Из рисунка 2 с видно, что для разгона электромобиля на высшей передаче  $u_{\text{кп2(в)}} = 3,207$  при скорости  $v < 15 \text{ км/ч}$  требуется момент  $M_{\text{эд}} = 417 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , превышающий номинальное значение. Поэтому в городских условиях при движении электромобиля на горизонтальном участке дороги при малых оборотах двигателя разгон необходимо осуществлять на низшей передаче (см. рисунок 2 д).

Аналогичные выводы можно сделать при рассмотрении карт КПД с вально-планетарной коробкой передач.

Из анализа таблицы 2 следует, что использование высокомоментного двигателя в безредукторной силовой установке увеличит общие затраты аккумуляторной батареи более чем в 1,8 раза.

Однокоростная коробка передач обеспечивает достижение электромобилем максимальной скорости на горизонтальной дороге, но не позволяет производить разгон при малых оборотах двигателя даже по относительно мягкому по условиям эксплуатации циклу NEDC и, кроме того, преодолевать максимальный подъем в 25 % (14,04°).

**Заключение.** Разработана методика расчетной оценки затрат энергии электромобиля для различных вариантов исполнения механической части силовой установки: без редуктора, с использованием редуктора и двух видов двухскоростных коробок передач (вальной и вально-планетарной). Сравнительная оценка проводится на основе рассмотрения европейского испытательного ездового цикла NEDC с учетом использования карт КПД тягового асинхронного электродвигателя.

Расчет затрат энергии аккумуляторной батареи развозного грузового электромобиля MAZ-4381EE для различных вариантов исполнения механической части силовой установки показал, что при безредукторной силовой установке с передаточным числом главной передачи  $u_{\text{гл(в)}} = 4,62$  величина номинального крутящего момента тягового электродвигателя должна составлять  $M_{\text{эдн}} = 1267 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Это значение в 3 раза превышает величину номинального крутящего момента в случае применения двухскоростной коробки передач. Во столько же раз должны быть увеличены

массо-габаритные параметры двигателя при сохранении той же мощности.

Применение в силовой установке электрогрузовика MAZ-4381EE двухскоростной коробки передач позволит использовать тяговый электродвигатель с меньшим значением номинального крутящего момента  $M_{\text{эдн}} = 414 \text{ Н}\cdot\text{м}$  при условии обеспечения заданного динамического фактора и максимальной скорости движения. Вследствие этого существенно, более чем в 1,8 раза, уменьшаются по сравнению с безредукторным вариантом общие энергетические затраты аккумуляторной батареи.

Силовая установка с двухскоростной коробкой передач позволяет адаптировать рабочие процессы тягового электродвигателя к нагрузочным условиям при движении электрогрузовика, максимально приближая его КПД к диапазону высокоэффективных значений, особенно в городских условиях с высокой степенью цикличности эксплуатации нагрузок.

*Работа выполнена при финансовой поддержке резервного фонда Президента Республики Беларусь с предоставлением гранта на 2021 год.*

## Список литературы

1. Харитонов, С.А. Перспективы использования коробок передач в электрических транспортных средствах / С.А. Харитонов, Э.И. Абасов // Тр. НАМИ. — 2017. — № 2(269). — С. 101–106.
2. Energy consumption and lifecycle cost analysis of electric city buses with multispeed gearboxes / A. Ritari [et al.] // Energies. — 2020. — Vol. 13, no. 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13082117>.
3. Обоснование параметров силовой установки развозного грузового электромобиля на базе автомобиля MAZ / С.Н. Поддубко [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2018. — Вып. 7. — С. 230–236.
4. Расчетная оценка запаса хода электромобиля на одной зарядке аккумуляторной батареи / С.Н. Поддубко [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2019. — Вып. 8. — С. 209–215.
5. Применение коробок передач в силовых приводах электротранспорта / С.Н. Поддубко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. — № 3(52). — С. 5–11.
6. Вахламов, В.К. Автомобили: эксплуатационные свойства: учеб. для вузов / В.К. Вахламов. — 2-е изд. — М.: Академия, 2006. — 240 с.
7. Медингер, Ч. Что следует учитывать при выборе асинхронного электродвигателя [Электронный ресурс] / Ч. Медингер // Control Engineering Россия. — 2018. — № 4(76). — С. 60–61. — Режим доступа: <https://controleng.ru/wp-content/uploads/7660.pdf>. — Дата доступа: 24.06.2020.
8. Hajduga, A. The use of multi-speed mechanical transmission in electric drives / A. Hajduga, A. Kieracińska // The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. — 2017. — Vol. 75, no. 1. — Pp. 39–67. DOI: <https://doi.org/10.14669/AM.VOL75.ART3>.
9. Ren, Q. Effect of transmission design on Electric Vehicle (EV) performance / Q. Ren, D.A. Crolla, A. Morris // 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. — 2009. — Pp. 1260–1265. DOI: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289707>.
10. On the comparison of 2- and 4-wheel-drive electric vehicle layouts with central motors and single- and 2-speed transmission

- systems / De Pinto S. [et al.] // *Energies*. — 2020. — Vol. 13, no. 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13133328>.
11. ZF presents two-speed drive for electric cars [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.electrive.com/2019/07/17/zf-presents-two-speed-transmission-for-electric-cars/>. — Date of access: 04.05.2021.
  12. Ruan, J. Comparison of power consumption efficiency of CVT and multi-speed transmissions for electric vehicle / J. Ruan, P. Walker, N. Zhang // *International Journal of Automotive Engineering*. — 2018. — Vol. 9, no. 4. — Pp. 268–275. DOI: [https://doi.org/10.20485/jsaeijae.9.4\\_268](https://doi.org/10.20485/jsaeijae.9.4_268).
  13. Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик. Ч. 1. Электромобили: ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011 (EN 1986-1:1997, IDT). — Введ. 01.03.12. — М.: Стандартинформ, 2012. — 23 с.
  14. Автомобили грузовые. Общие технические требования: ГОСТ Р 52280-2004. — Введ. 01.07.05. — М.: Изд-во стандартов, 2005. — 12 с.

PODDUBKO Sergey N., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Director General<sup>1</sup>

E-mail: [bats@ncpmm.bas-net.by](mailto:bats@ncpmm.bas-net.by)

ISHIN Nikolay N., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Chief of the R&D Center “Mining Machinery”<sup>1</sup>

E-mail: [ishin@oim.by](mailto:ishin@oim.by)

GOMAN Arkadiy M., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Department of Dynamic Analysis and Vibration-based Diagnostics of Machines<sup>1</sup>

E-mail: [arcady.mih@tut.by](mailto:arcady.mih@tut.by)

SKOROKHODOV Andrey S., Ph. D. in Eng.

Leading Researcher of the Department of Dynamic Analysis and Vibration-based Diagnostics of Machines<sup>1</sup>

E-mail: [skanst@yandex.ru](mailto:skanst@yandex.ru)

SHPORTKO Vladimir V., M. Sc. in Phys. and Math.

Researcher of the Department of Dynamic Analysis and Vibration-based Diagnostics of Machines<sup>1</sup>

E-mail: [llii7pot@yandex.ru](mailto:llii7pot@yandex.ru)

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 11 June 2021.

## ENERGY EFFICIENCY OF GEARBOXES APPLICATION IN POWER UNITS OF ELECTRIC VEHICLES

*With all advantages, electric vehicles have a significant disadvantage — a relatively small driving range on a single charge of the traction battery compared to cars using hydrocarbon fuel. The solution to the issue is to choose a rational structural scheme of an electromechanical power unit to obtain its high energy efficiency regardless of the operating conditions. A significant number of electric vehicles produced today either do not contain gearboxes or contain single-speed reducers. The use of a multi-speed gearbox solves the problem of adapting the working processes of a traction electric motor to the loading conditions, bringing its efficiency as close as possible to the range of highly efficient values. Calculated estimation of energy consumption of the MAZ-4381EE electric delivery truck is carried out in the paper for various versions of the mechanical part of power unit: without a reducer, with the use of a reducer and two types of two-speed gearboxes (shaft and shaft-planetary). The evaluation is made based on consideration of the European test driving cycle NEDC, taking into account the use of efficiency maps of the traction induction electric motor. The calculation results showed that the use of two-speed gearboxes can reduce the total energy consumption by more than 1.8 times compared to a power unit with a high-torque motor and without a gearbox.*

**Keywords:** *electric truck, driving range, energy efficiency, power unit, battery, traction electric motor, efficiency map, gearbox, gear ratio*

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-5-12>

## References

1. Kharitonov S.A., Abasov E.I. Perspektivy ispolzovaniya korobok peredach v elektricheskikh transportnykh sredstvakh [Prospects of gearbox usage in electric transport]. *Trudy NAMI*, 2017, no. 2(269), pp. 101–106 (in Russ.).
2. Ritari A., Vepsäläinen J., Kivekäs K., Tammi K., Laitinen H. Energy consumption and lifecycle cost analysis of electric city buses with multispeed gearboxes. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13082117>.
3. Poddubko S.N., Ishin N.N., Goman A.M., Skorokhodov A.S., Natyryeva M.K. Obosnovanie parametrov silovoy ustanovki razvoznogo gruzovogo elektromobilya na baze avtomobilya MAZ [Justification of parameters of the power unit of the delivery electric truck on the basis of MAZ vehicle]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2018, iss. 7, pp. 230–236 (in Russ.).
4. Poddubko S.N., Ishin N.N., Goman A.M., Skorokhodov A.S., Shportko V.V. Raschetnaya otsenka zapasa khoda elektromobilya na odnoy zaryadke akkumulyatornoy batarei [Estimation of electric vehicle drive range on a single charge of the storage battery]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2019, iss. 8, pp. 209–215 (in Russ.).
5. Poddubko S.N., Ishin N.N., Goman A.M., Skorokhodov A.S., Shabanov P.A. Primenenie korobok peredach v silovykh privodakh elektrotransporta [Application of gearboxes in power drives of electric vehicles]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 3(52), pp. 5–11 (in Russ.).
6. Vakhlamov V.K. *Avtomobili: Eksploatsionnye svoystva* [Cars: Operational properties]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 240 p. (in Russ.).
7. Medinger C. What to consider when choosing an ac induction motor. *Control engineering*, 2018. Available at: <https://www.controleng.com/articles/what-to-consider-when-choosing-an-ac-induction-motor/>.
8. Hajduga A., Kieracińska A. The use of multi-speed mechanical transmission in electric drives. *The archives of automotive engineering – Archiwum motoryzacji*, 2017, vol. 75, no. 1, pp. 39–67. DOI: <https://doi.org/10.14669/AM.VOL75.ART3>.
9. Ren Q., Crolla D.A., Morris A. Effect of transmission design on electric vehicle (EV) performance. *Proc. 2009 IEEE Vehicle power and propulsion conference*. Dearborn, MI, 2009, pp. 1260–1265. DOI: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289707>.
10. De Pinto S., Camocardi P., Chatzikomis C., Sorniotti A., Bottiglione F., Mantriota G., Perlo P. On the comparison of 2- and 4-wheel-drive electric vehicle layouts with central motors and single- and 2-speed transmission systems. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13133328>.
11. Hampel C. *ZF presents two-speed drive for electric cars*. 2019. Available at: <https://www.electrive.com/2019/07/17/zf-presents-two-speed-transmission-for-electric-cars/> (accessed 04 May 2021).
12. Ruan J., Walker P., Zhang N. Comparison of power consumption efficiency of CVT and multi-speed transmissions for electric vehicle. *International journal of automotive engineering*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 268–275. DOI: [https://doi.org/10.20485/jsaeijae.9.4\\_268](https://doi.org/10.20485/jsaeijae.9.4_268).
13. State Standard R EN 1986-1-2011. *Avtomobili s elektricheskoy tyagoy. Izmerenie energeticheskikh kharakteristik. Ch. 1. Elektromobili* [Electrically propelled road vehicles. Measurement of energy performances. Part 1. Pure electric vehicles]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 23 p. (in Russ.).
14. State Standard R 52280-2004. *Avtomobili gruzovye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [Trucks. General technical requirements]. Moscow, Standartov Publ., 2005. 12 p. (in Russ.).