



МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 629.33; 621.3

С.Н. ПОДДУБКО, канд. техн. наук, доц.
генеральный директор¹
E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

Н.Н. ИШИН, д-р техн. наук, доц.
начальник научно-технического центра «Карьерная техника»¹
E-mail: nik_ishin@mail.ru

А.М. ГОМАН, канд. техн. наук, доц.
начальник отдела динамического анализа и вибродиагностики машин¹
E-mail: arcady.mih@tut.by

А.С. СКОРОХОДОВ, канд. техн. наук
ведущий научный сотрудник отдела динамического анализа и вибродиагностики машин¹
E-mail: skanst@yandex.ru

П.Э. ШАБАНОВ
главный конструктор по автомобильной технике — начальник управления главного конструктора²
E-mail: office@maz.by

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²ОАО «МАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАВТОМАЗ», г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 08.06.2020.

ПРИМЕНЕНИЕ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ В СИЛОВЫХ ПРИВОДАХ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Одним из недостатков электромобилей является ограниченный запас хода на одной зарядке аккумуляторной батареи, значительно зависящий от условий эксплуатации. До настоящего времени в силовых электромеханических установках транспортных машин чаще всего используется 1-ступенчатый понижающий редуктор. Попытка увеличения запаса хода электрогрузовиков за счет увеличения емкости тяговых батарей приводит к существенному снижению их грузоподъемности. В данной работе задача повышения энергоэффективности электромобилей решается посредством применения в силовых установках многоступенчатых коробок передач. Они позволяют адаптировать силовую установку к совместной работе в зоне высокой эффективности тягового электродвигателя и инвертора, что обеспечивает снижение энергопотребления электротранспорта. Приводится пример расчета передаточных чисел 2-ступенчатой коробки передач для экспериментального грузового электромобиля МАЗ-4381ЕЕ и различные варианты выполнения кинематических схем коробки. Кроме того, применение 2-ступенчатой коробки передач позволяет реализовать два задаваемых техническими условиями параметра, обеспечивающих эффективность электромобиля: динамический фактор, характеризующий его тягово-скоростные свойства, и максимальную скорость движения.

Ключевые слова: грузовой электромобиль, запас хода, тяговый электродвигатель, коробка передач, передаточное число

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-5-11>

Введение. Современные электромеханические силовые установки электромобилей в большинстве случаев оснащаются высокооборотными тяговыми электродвигателями и 1-ступенчатыми понижаю-

щими редукторами. Несмотря на очевидные преимущества, одним из недостатков электромобилей является их ограниченный запас хода на одной зарядке, который зависит от емкости тяговой батареи

и условий эксплуатации [1, 2]. Увеличение запаса хода приводит к росту веса и стоимости тяговых аккумуляторных батарей и автомобиля в целом. Особенно остро стоит эта проблема при проектировании грузового электрического транспорта [3]. Увеличение запаса хода за счет повышения емкости тяговых батарей приводит к существенному снижению грузоподъемности электрогрузовиков. Еще одной проблемой является значительное время зарядки тяговых батарей даже при использовании зарядных устройств большой мощности.

В силовом электроприводе с 1-ступенчатым понижающим редуктором тяговый электродвигатель работает в широком диапазоне оборотов, причем на малых оборотах вследствие относительно низкого КПД имеет место перегрев и двигателя, и тяговых батарей, увеличивается расход энергии, снижается общий показатель пробега электромотоцикла на одной зарядке.

Кроме того, 1-ступенчатые понижающие редукторы затрудняют одновременную реализацию двух задаваемых техническими условиями параметров эффективности электромотоцикла: динамического фактора [4], характеризующего его тягово-скоростные свойства, и максимальной скорости движения.

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 [4]. При наличии понижающей передачи может быть использован тяговый электродвигатель меньшей мощности, чем при использовании двигателя с большим максимальным крутящим моментом на низких оборотах, что позволяет улучшить массо-габаритные и стоимостные параметры силовой установки [5]. При этом для реализации максимальной скорости движения требуется еще одна передача с меньшим передаточным отношением.

Современные тяговые электродвигатели (асинхронные, синхронные с возбуждением от постоянных магнитов) электромотоциклов благодаря системам управления обладают улучшенными тяговыми характеристиками. Они также характеризуются высокими значениями КПД (до 95–98 %) как в тяговом режиме, так и в режиме рекуперативного торможения в определенных диапазонах оборотов вала двигателя.

Примером тому может служить электромеханическая характеристика (рисунок 1) синхронного электродвигателя электромотоцикла Nissan Leaf с возбуждением от постоянных магнитов с указанием зон эффективности (КПД) с учетом потерь энергии в инверторе.

Установленный в электромотоцикле синхронный трехфазный электродвигатель EM61 имеет номинальную мощность 80 кВт [7]. Двигатель развивает максимальный крутящий момент $M_{эдmax} = 280 \text{ Н}\cdot\text{м}$ в диапазоне частот вращения ротора $0 < n < n_0 = 2730 \text{ мин}^{-1}$.

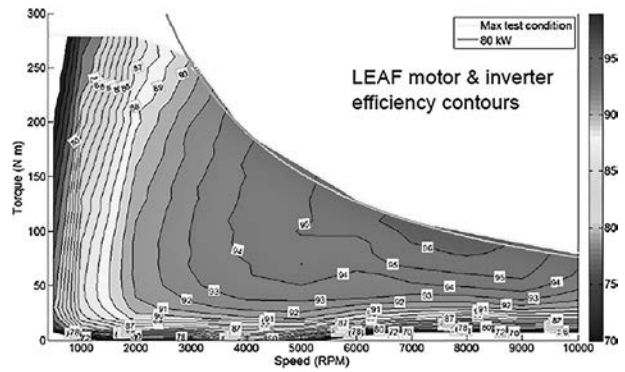


Рисунок 1 — Электромеханическая характеристика синхронного электродвигателя электромотоцикла Nissan Leaf [6] и зоны его эффективности (КПД) с учетом потерь энергии в инверторе
Figure 1 — Electromechanical characteristic of the synchronous electric motor of the Nissan Leaf electric vehicle [6] and its efficiency zones (efficiency coefficient) taking into account energy losses in the inverter

Мощность электродвигателя имеет постоянное значение $N_{эд} = 80 \text{ кВт}$ в диапазоне частот вращения ротора $2730 < n < 9800 \text{ мин}^{-1}$. В диапазоне частот вращения $0 < n < 2730 \text{ мин}^{-1}$ мощность электродвигателя изменяется по линейному закону от нуля до максимального значения $N_{эд} = 80 \text{ кВт}$.

Однако, как видно из рисунка 1, существуют также диапазоны скоростей и крутящих моментов с пониженными значениями КПД. Вследствие этого потребление электроэнергии от аккумуляторных батарей значительно зависит от условий эксплуатации электромотоцикла.

Из рисунка 1 также видно, что наибольшая производительность электродвигателя достигается в относительно небольшой зоне изменения крутящего момента $50 \text{ Н}\cdot\text{м} < M_{эд} < 175 \text{ Н}\cdot\text{м}$ в диапазоне частот вращения $3500 \text{ мин}^{-1} < n < 9500 \text{ мин}^{-1}$. Наибольшая эффективность преобразования электрической энергии в механическую имеет место при работе двигателя с одной и той же мощностью на более высоких скоростях вращения по сравнению с зонами, соответствующими более высоким значениям крутящего момента и меньшим скоростям вращения.

Очевидно, что с точки зрения эффективности преобразования электрической энергии в механическую энергию работа двигателя с той же мощностью на более высоких скоростях предпочтительнее по сравнению с работой при более высоких значениях крутящих моментов.

В городских условиях эксплуатации электромотоцикла, характеризующихся относительно низкой скоростью движения и частыми ускорениями, тяговый электродвигатель работает в диапазоне низких скоростей вращения и высоких крутящих моментов. Этой области соответствует более низкое значение КПД электродвигателя — примерно на 15 % по сравнению с номинальным значением.

Поэтому представляется целесообразным адаптировать конфигурацию электропривода для получения его высокой эффективности независимо от условий эксплуатации привода, что в свою

очередь позволит снизить энергопотребление без увеличения энергоемкости аккумуляторных батарей. Таким решением может быть использование многоступенчатых коробок передач в электромеханических силовых установках электромобилей.

В данной работе рассматриваются вопросы выбора передаточных отношений многоступенчатых коробок передач, обеспечивающих повышение эффективности энергопотребления электромобилей. Приводится пример расчета параметров 2-ступенчатой коробки передач экспериментального грузового электромобиля МАЗ-4381ЕЕ и различные варианты выполнения кинематических схем этой коробки.

Определение передаточных чисел коробки передач. Выбор числа ступеней и кинематической схемы коробки передач существенно зависит от типа электродвигателя, его электромеханической характеристики.

Сегодня силовые установки гибридных автомобилей и электромобилей оснащены высокооборотными (9000–12 000 мин⁻¹) тяговыми электродвигателями переменного тока [8–10]. Уже появляются двигатели, работающие при 20 000 мин⁻¹, идут работы над электродвигателями, работающими на скорости 30 000 мин⁻¹ [10]. Применение высокооборотных двигателей обусловлено тем, что при равной мощности низкооборотный высокомоментный двигатель гораздо крупнее, тяжелее и менее эффективен, чем высокооборотный. Именно поэтому в электромобилях применяются высокооборотные низкомоментные двигатели в комплекте с понижающими редукторами [11]. К тому же, цена электродвигателя пропорциональна его массе [10].

Требуемая механическая мощность тягового электродвигателя в соответствии с общепринятыми методиками [4] определяется из условия движения электромобиля с максимальной скоростью на горизонтальном участке дороги.

По своим техническим характеристикам наиболее приемлемыми являются асинхронные или синхронные электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Типовая электромеханическая характеристика таких электродвигателей показана на рисунке 2. В широком диапазоне частот вращения вала электродвигателя $n_0 < n < n_{\max}$ электромеханическая характеристика описывается гиперболическим законом.

На рисунке 2 в интервале частот вращения $n_1 < n < n_2$ выделена (черным цветом) зона эффективной работы электродвигателя совместно с инвертором.

Передаточное число низшей передачи u_n находится исходя из величины максимального динамического фактора D_{\max} , необходимой для преодоления максимального сопротивления дороги ψ_{\max} [12, 13]. При равномерном движении $D_{\max} = \psi_{\max}$. Передаточное число u_n рассчитывается по формуле:

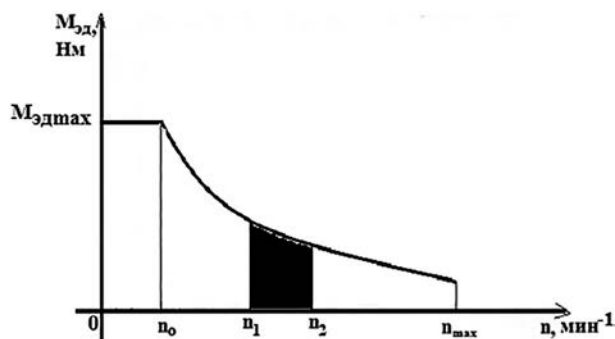


Рисунок 2 — Типовая электромеханическая характеристика тягового электродвигателя
Figure 2 — Typical electromechanical characteristic of a traction electric motor

$$u_n = \frac{m_a g \psi_{\max} r_k}{M_{\text{Эдmax}} \eta_{\text{тр}} u_{\text{гл}}}, \quad (1)$$

где m_a — полная масса автомобиля, кг; $g = 9,81$ — ускорение свободного падения, м/с²; $M_{\text{Эдmax}}$ — максимальный момент электродвигателя, Н·м; $\eta_{\text{тр}}$ — КПД механической части силовой установки; r_k — радиус колеса, м; $u_{\text{гл}}$ — передаточное число главной передачи.

Передаточное число высшей передачи u_b рассчитывается по максимальной скорости движения автомобиля:

$$u_b = \frac{n_{\max} \cdot r_k}{9,55 \cdot u_{\text{гл}} \cdot V_{\max}}, \quad (2)$$

где n_{\max} — максимальная частота вращения тягового электродвигателя, мин⁻¹; V_{\max} — максимальная скорость движения электромобиля, м/с.

Участки тяговой характеристики электромобиля, соответствующие низшей и высшей передачам, показаны на рисунке 3. Сплошной линией на рисунке обозначена зависимость силы тяги от скорости движения электромобиля на низшей передаче (н), пунктирной — на высшей (в).

Скорость электромобиля V связана с частотой вращения электродвигателя n зависимостью:

$$V = \frac{n \cdot r_k}{9,55 \cdot u_{\text{кп}} \cdot u_{\text{гл}}}, \text{ м/с,}$$

где $u_{\text{кп}}$ — передаточное число коробки передач.

Сила тяги F_T электромобиля рассчитывается по формуле:

$$F_T = \frac{M_{\text{Эд}} \cdot u_{\text{кп}} \cdot u_{\text{гл}} \cdot \eta_{\text{тр}}}{r_k}, \text{ Н.}$$

На рисунке 3 выделены зоны (н), (в), соответствующие зоне (n_1, n_2) эффективной работы электродвигателя (рисунок 2): зона (н) относится к низшей передаче, зона (в) — к высшей передаче. Скорости движения электромобиля V_{11}, V_{12} соответствуют частотам вращения электродвигателя n_1, n_2 на низшей передаче, V_{21}, V_{22} — на высшей передаче.

По значениям передаточных чисел низшей и высшей передач могут быть определены передаточные числа промежуточных передач из условия того, чтобы весь диапазон тяговой характеристики

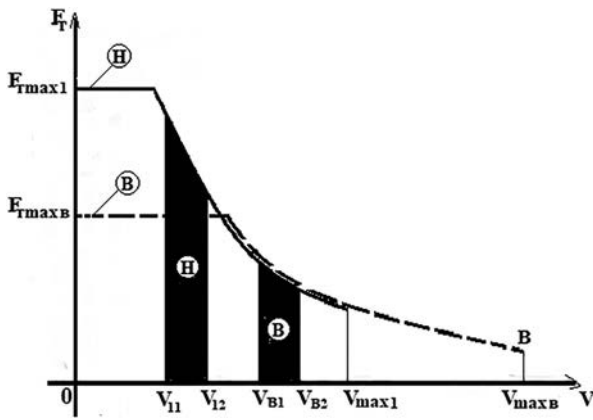


Рисунок 3 — Участки тяговой характеристики электромобиля, соответствующие низшей (н) и высшей (в) передачам
Figure 3 — Sections of the traction characteristic of an electric vehicle corresponding to the low (n) and high (v) gears

электромобиля максимально возможно соответствовал зоне эффективной работы электродвигателя [14].

Например, в случае 3-ступенчатой коробки передач, в интервале скоростей (V_{12} , V_{B1}) передаточное число коробки может быть рассчитано по формуле

$$u_{кп} = \frac{n_1 \cdot r_k}{9,55 \cdot V_{12} \cdot u_{гп}}$$

Применение 2-ступенчатой коробки передач в силовом приводе экспериментального образца грузового электромобиля МАЗ-4381ЕЕ. В качестве базового при создании электрогрузовика был принят грузовой среднетоннажный автомобиль МАЗ-4381С0. Электрогрузовик грузоподъемностью до 6000 кг предназначается для перевозки различных хозяйственных товаров в городских условиях.

Согласно ТЗ экспериментальный образец электромобиля МАЗ-4381ЕЕ должен удовлетворять следующим техническим требованиям:

- полная масса — 12 000 кг;
- максимальная скорость — 90 км/ч;
- максимальный преодолеваемый подъем — 25 %;
- тип тягового электродвигателя — асинхронный, с векторной системой регулирования;
- максимальная мощность тягового электродвигателя — 130 кВт;
- число ступеней коробки передач силовой установки — 2.

Электромеханическая характеристика асинхронного электродвигателя ТАЕМ-130W, спроектированного в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, показана на рисунке 4. Максимальный момент в диапазоне частот вращения вала двигателя $0 < n < 3000$ мин⁻¹ равен $M_{Эд\max} = 414$ Н·м.

Расчет передаточного числа 1-ступенчатого понижающего редуктора силовой установки электромобиля. Передаточное число 1-ступенчатого понижающего редуктора определяется из кинематического критерия — достижения электрогрузовиком максимальной скорости $V_{\max} = 90$ км/ч (25 м/с) при частоте вращения вала электродвигателя

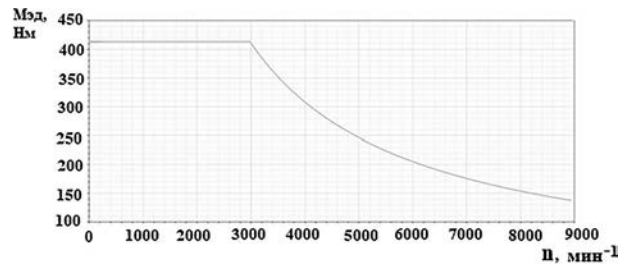


Рисунок 4 — Электромеханическая характеристика асинхронного электродвигателя ТАЕМ-130W
Figure 4 — Electromechanical characteristic of the asynchronous electric motor TAEM-130W

теля $n_{\max} = 9000$ мин⁻¹. Из выражения (2) для значений $r_k = 0,392$ м, $u_{гп} = 4,62$ следует:

$$u_B = \frac{n_{\max} \cdot r_k}{9,55 \cdot u_{гп} \cdot V_{\max}} = \frac{9000 \cdot 0,392}{9,55 \cdot 4,62 \cdot 25} = 3,2.$$

Величина максимального динамического фактора D_{\max} [4] для развозных грузовых электромобилей в соответствии с ГОСТ Р 52280-2004 [15] определяется из условия преодоления максимального подъема, равного 25 % (14,04°):

$$D_{\max} = \psi_{\max} = f \cos \alpha + \sin \alpha = 0,01 \cos 14,04^\circ + \sin 14,04^\circ = 0,2523,$$

где $f = 0,01$ — коэффициент сопротивления качению.

В этом случае из критерия преодоления максимального подъема определяется максимальное значение момента электродвигателя. Его величина находится из выражения (1) для значений $m_a = 12\,000$ кг, $\eta_{гп} = 0,92$:

$$M_{1Эд\max} = \frac{m_a \cdot g \cdot \psi_{\max} \cdot r_k}{u_B \cdot \eta_{гп} \cdot u_{гп}} = \frac{0,2523}{3,2 \cdot 0,92 \cdot 4,62} = 856, \text{ Н·м.}$$

В случае применения в силовом электроприводе электрогрузовика МАЗ-4381ЕЕ 1-ступенчатого понижающего редуктора необходимо увеличивать максимальный момент тягового электродвигателя ТАЕМ-130W более чем в два раза ($856/414 = 2,07$), что при той же мощности $N_{Эд} = 130$ кВт приведет к существенному увеличению его массо-габаритных параметров и ухудшению эффективности работы.

Таким образом, возникает необходимость в использовании в силовой установке электрогрузовика МАЗ-4381ЕЕ коробки передач как минимум с двумя ступенями.

Расчет передаточных чисел 2-ступенчатой коробки передач. Передаточное число первой передачи рассчитывается через значение максимального динамического фактора (формула (1)):

$$u_1 = \frac{m_a \cdot g \cdot \psi_{\max} \cdot r_k}{M_{Эд\max} \cdot \eta_{гп} \cdot u_{гп}} = \frac{12\,000 \cdot 9,81 \cdot 0,2523 \cdot 0,392}{414 \cdot 0,92 \cdot 4,62} = 6,6.$$

Передаточное число высшей (второй) передачи определяется по формуле (2):

$$u_{11} = \frac{n_{\max} \cdot r_k}{9,55 \cdot u_{гп} \cdot V_{\max}} = \frac{9000 \cdot 0,392}{9,55 \cdot 4,62 \cdot 25} = 3,2.$$

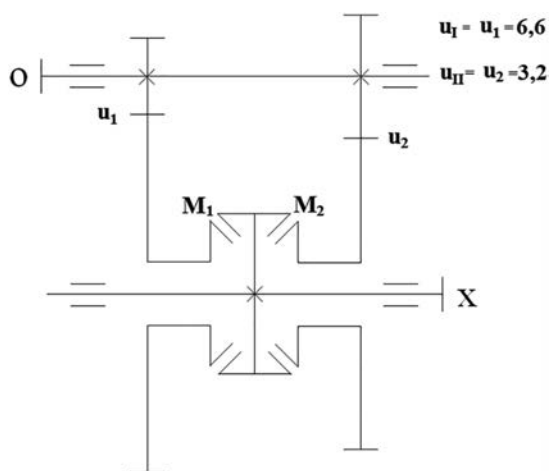


Рисунок 5 — Кинематическая схема несоосной вальной 2-ступенчатой коробки передач: u — передаточные числа; индексы 1, 2 относятся к зубчатым парам; индексы I, II — к номерам передач
 Figure 5 — Kinematic scheme of a non-coaxial shaft two-stage gearbox: u — gear ratios; indexes 1, 2 refer to gear pairs; indexes I, II — to the gear numbers

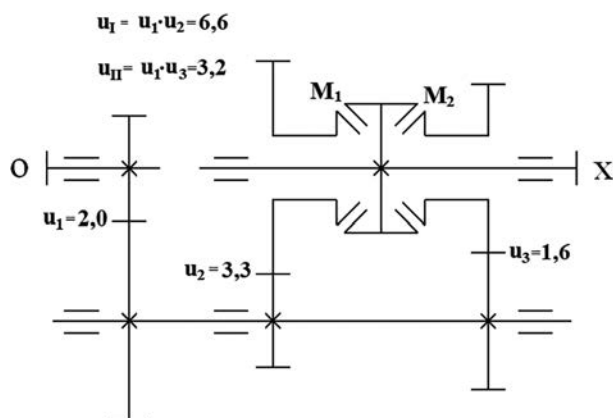


Рисунок 6 — Кинематическая схема соосной вальной 2-ступенчатой коробки передач с переключением передач с помощью синхронизирующей зубчатой муфты
 Figure 6 — Kinematic scheme of a coaxial shaft two-stage gearbox with gear shifting using a synchronizing gear clutch

Передаточное число первой передачи $u_1 = 6,6$ может быть реализовано с помощью одной зубчатой передачи. Вариант кинематической схемы такой несоосной вальной 2-ступенчатой коробки передач показан на рисунке 5. В этой схеме силовой поток на первой и второй передачах передается через одно из зубчатых зацеплений, переключение передач осуществляется с помощью синхронизирующей зубчатой муфты.

Однако в данном случае расчетное значение u_1 превышает рекомендуемое максимальное значение $u_{max} = 6,3$ [16].

На рисунке 6 представлена кинематическая схема соосной вальной 2-ступенчатой коробки передач с переключением передач с помощью синхронизирующей зубчатой муфты, на рисунке 7 — кинематическая схема вально-планетарной 2-ступенчатой коробки передач с переключением передач без разрыва потока мощности с помощью фрикционных муфт.

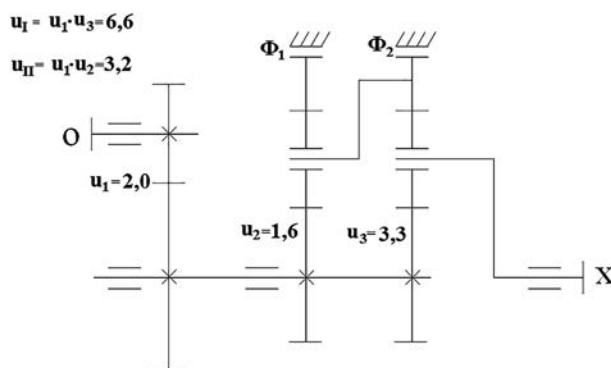


Рисунок 7 — Кинематическая схема вально-планетарной 2-ступенчатой коробки передач с переключением передач без разрыва потока мощности с помощью фрикционных муфт
 Figure 7 — Kinematic scheme of a shaft-planetary two-stage gearbox with gear shifting without breaking the power flow using friction clutches

При замыкании фрикциона Φ_2 (см. рисунок 7) работает второй планетарный ряд коробки передач с передаточным отношением $u_3 = 3,3$. При замыкании фрикциона Φ_1 работают оба планетарных ряда с общим передаточным отношением $u_2 = 1,6$.

Эффективность использования 2-ступенчатой коробки передач в силовой установке электрогрузовика МАЗ-4381ЕЕ. В условиях эксплуатации электрогрузовик может двигаться на различных режимах: разгон (ускорение), установившееся движение (равномерное), торможение (замедление) и движение накатом. При этом в городских условиях продолжительность движения в установившемся режиме составляет примерно 20 %, разгон — 40 %, торможение и накат — 40 % [4].

Преимущества использования 2-ступенчатой коробки передач для электромобиля заключаются в следующем:

- в силовой установке электрогрузовика может быть использован тяговый электродвигатель с меньшим по величине максимальным моментом при условии обеспечения заданного динамического фактора и максимальной скорости, вследствие чего уменьшаются массово-габаритные параметры электродвигателя;
- 2-ступенчатый режим силовой установки увеличивает зону высокой энергетической эффективности совместной работы электродвигателя и инвертора при движении электрогрузовика в городских условиях, улучшает тягово-скоростные характеристики электромобиля;
- повышение энергетической эффективности силовой установки позволяет уменьшить требуемую емкость тяговой батареи при сохранении дальности хода электрогрузовика на одной зарядке, а стало быть, уменьшить стоимость и массу батарей.

По данным производителей электромобилей применение многоступенчатых коробок передач в составе электромеханических силовых установок существенно снижает энергопотребление электромобиля (от 5 до 16 %), позволяет реализовать требуемые динамические и скоростные характеристики электротранспорта [17].

Заключение. 1. Современные тяговые электродвигатели (асинхронные, синхронные с возбуждением от постоянных магнитов) электромобилей благодаря системам управления обладают оптимальными для транспортных машин тяговыми характеристиками. В определенных диапазонах оборотов эти электродвигатели имеют КПД до 98 %.

2. Для электротранспорта, оснащенного 1-ступенчатыми понижающими редукторами, увеличение запаса хода возможно за счет увеличения емкости тяговых аккумуляторов, что заметно снижает грузоподъемность и увеличивает стоимость машин. При этом тяговый электродвигатель вынужден работать в широком диапазоне оборотов, что снижает общий КПД силового электропривода и увеличивает расход энергии аккумуляторных батарей.

3. Применение в силовых установках электромобилей многоступенчатых коробок передач позволяет адаптировать конфигурацию и параметры силового электропривода к условиям эксплуатации исходя из требований максимальной эффективности и снизить общее энергопотребление машины.

4. Силовая установка с 2-ступенчатой коробкой передач увеличивает зону высокой энергетической эффективности электродвигателя и инвертора при движении электрогрузовика, особенно в городских условиях с высокой степенью цикличности.

5. Использование в силовой установке электрогрузовика МАЗ-4381ЕЕ 2-ступенчатой коробки передач позволит использовать тяговый электродвигатель с меньшим значением максимального крутящего момента при условии обеспечения заданного динамического фактора и максимальной скорости движения, вследствие чего уменьшаются массово-габаритные параметры привода.

Список литературы

1. Харитонов, С.А. Перспективы использования коробок передач в электрических транспортных средствах / С.А. Харитонов, Э.И. Абасов // Труды 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 шасси МАЗ / 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. Вахламов, В.К. Автомобили: Эксплуатационные свойства: учеб. для вузов / В.К. Вахламов. — 2-е изд., стер. — М.: Академия, 2006. — 240 с.
5. 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.
6. Laitinen, H. Improving electric vehicle energy efficiency with two-speed gearbox: abstract of thesis ... for the degree of master of science in technology [Electronic resource] / H. Laitinen. — Espoo, 2017. — 59 p. — Mode of access: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/27105/master_Laitinen_Heikki_2017.pdf. — Date of access: 15.06.2020.
7. Nissan LEAF доступный недорогой электромобиль [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://autotesla.ru/other-elektrokar/elektromobili-nissan/nissan-leaf-obzor-elektromobilya.html>. — Дата доступа: 15.06.2020.
8. Мигаль, В.Д. Техническая диагностика автомобилей: справ. пос. в 6 т. Т. 6: Диагностическое обеспечение технической и экологической безопасности / В.Д. Мигаль. — Харьков: Майдан, 2012. — 538 с.
9. Златин, П.А. Электромобили и гибридные автомобили / П.А. Златин, В.А. Кеменов, И.П. Ксенович. — М.: Агроконсалт, 2004. — 416 с.
10. Brauer, S. High speed electric vehicle transmission: Investigation how noise vibration harshness are affected at high speeds in an electric vehicle transmission: degree project for master of science in engineering, mechanical engineering [Electronic resource] / S. Brauer. — Karlstad, 2017. — 84 p. — Mode of access: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1131147/FULLTEXT01.pdf>. — Date of access: 07.07.2020.
11. Шумов, Ю.Н. Энергосберегающие электрические машины для привода электромобилей и гибридных автомобилей (Обзор зарубежных разработок) / Ю.Н. Шумов, А.С. Сафонов // Электричество. — 2016. — № 1. — С. 55–65.
12. Comprehensive design and optimization of an electric vehicle powertrain equipped with a two-speed dual-clutch transmission / Y. Wang [et al.] // Advances in Mechanical Engineering. — 2017. — Vol. 9, No. 1. — Pp. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814016683144>.
13. Parameters optimization of two-speed powertrain of electric vehicle based on genetic algorithm / Y. Li [et al.] // Advances in Mechanical Engineering. — 2020. — Vol. 12, No. 1. — Pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814020901652>.
14. 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.
15. Автомобили грузовые. Общие технические требования: ГОСТ Р 52280-2004. — Введ. 01.07.05. — М.: Изд-во стандартов, 2005. — 12 с.
16. Решетов, Д.Н. Детали машин: учеб. для вузов / Д.Н. Решетов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1989. — 496 с.
17. Progress in automotive transmission technology / X. Xu [et al.] // Automotive Innovation. — 2018. — Vol. 1. — Pp. 187–210. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42154-018-0031-y>.

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

Director General¹

E-mail: p-s-n@tut.by

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

Chief of the R&D Center “Mining Machinery”¹

E-mail: nik_ishin@mail.ru

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

Head of the Department of Dynamic Analysis and Vibration-based Diagnostics of Machines¹

E-mail: arcady.mih@tut.by

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

Leading Researcher of the Department of Dynamic Analysis and Vibration-based Diagnostics of Machines¹

E-mail: skanst@yandex.ru

SHABANOV Pavel A.

Chief Designer for Automotive Technology – Head of the Chief Designer's Department²

E-mail: office@maz.by

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²JSC “Minsk Automobile Plant” – managing company of “BELAVTOMAZ” holding, Minsk, Republic of Belarus

Received 08 June 2020.

APPLICATION OF GEARBOXES IN POWER DRIVES OF ELECTRIC VEHICLES

One of the disadvantages of electric vehicles is the limited driving range on a single charge, which depends significantly on the operating conditions. Until now, in electromechanical power units of transport vehicles, a single-stage gear reducer is most often used. An attempt to increase the driving range on a single charge of electric trucks due to an increase of the traction batteries capacity leads to a significant reduction in their load capacity. In this paper, the problem of improving the energy efficiency of electric vehicles is solved by using multistage gearboxes in power units. They make it possible to adapt the power unit to a joint operation in the high-efficiency zone of the traction electric motor and inverter, which ensures the energy consumption reduction of electric vehicles. An example of calculating the gear ratios of a two-stage gearbox for the experimental delivery electric truck MAZ-4381EE and different variants of the gearbox kinematic schemes are given. Furthermore, the use of a two-stage gearbox makes it possible to implement two parameters specified by the technical requirements that ensure the effective operation of the electric vehicle: the dynamic factor, characterizing its traction-speed properties, and the maximum speed.

Keywords: electric truck, driving range on a single charge, traction electric motor, gearbox, gear ratio

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-5-11>

References

1. Kharitonov S.A., Abasov E.I. Perspektivy ispolzovaniya korobok peredach v elektricheskikh transportnykh sredstvakh [Prospects for the use of gearboxes in electric vehicles]. *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., Natureva M.K. Obosnovanie parametrov silovoy ustanovki razvoznogo gruzovogo elektromobilya na baze shassi MAZ [Justification of parameters of the power unit of the delivery electric truck on the basis of MAZ chassis]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2018, iss. 7, pp. 230–236 (in Russ.).
4. Vakhlamov V.K. *Avtomobili: Eksploatatsionnye svoystva* [Automobiles: Operation properties]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 240 p. (in Russ.).
5. Medinger C. What to consider when choosing an ac induction motor. *Control Engineering Russia*, 2018. Available at: <https://www.controleng.com/articles/what-to-consider-when-choosing-an-ac-induction-motor/>.
6. Laitinen H. *Improving electric vehicle energy efficiency with two-speed gearbox*. Extended Abstract M. Sc. Thesis. Espoo, 2017. 59 p. Available at: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/27105/master_Laitinen_Heikki_2017.pdf (accessed 15 June 2020).
7. *Nissan LEAF dostupnyy nedorogoy elektromobil* [Nissan LEAF affordable inexpensive electric car]. 2016. Available at: <http://auto-tesla.ru/other-elektrokar/elektromobili-nissan/nissan-leaf-obzor-elektromobilya.html> (accessed 15 June 2020) (in Russ.).
8. Migal V.D. *Tekhnicheskaya diagnostika avtomobiley. Tom 6: Diagnosticheskoe obespechenie tekhnicheskoy i ekologicheskoy bezopasnosti* [Technical diagnostics of cars. Vol. 6: Diagnostic support for technical and environmental safety]. Kharkiv, Maydan Publ., 2012. 538 p. (in Russ.).
9. Zlatin P.A., Kemenov V.A., Ksenevich I.P. *Elektromobili i gibridnye avtomobili* [Electric and hybrid vehicles]. Moscow, Agrokonsalt Publ., 2004. 416 p. (in Russ.).
10. Brauer S. *High speed electric vehicle transmission: Investigation how noise vibration harshness are affected at high speeds in an electric vehicle transmission*. M. Sc. Thesis. Karlstad, 2017. 84 p. Available at: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1131147/FULLTEXT01.pdf> (accessed 7 July 2020).
11. Shumov Yu.N., Safonov A.S. Energosberegayushchie elektricheskie mashiny dlya privoda elektromobiley i gibridnykh avtomobiley (Obzor zarubezhnykh razrabotok) [Energy-saving electric machines for the drive of electric and hybrid vehicles (Review of foreign developments)]. *Elektricheskoye*, 2016, no. 1, pp. 55–65 (in Russ.).
12. Wang Y., Lü E., Lu H., Zhang N., Zhou X. Comprehensive design and optimization of an electric vehicle powertrain equipped with a two-speed dual-clutch transmission. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814016683144>.
13. Li Y., Zhu B., Zhang N., Peng H., Chen Y. Parameters optimization of two-speed powertrain of electric vehicle based on genetic algorithm. *Advances in Mechanical Engineering*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814020901652>.
14. 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/jsaejiae.9.4_268.
15. State Standard R 52280–2004. *Avtomobili gruzovyye. Obshchie tekhnicheskyye trebovaniya* [Trucks. General technical requirements]. Moscow, Standartov Publ., 2005. 12 p. (in Russ.).
16. Reshetov D.N. *Detali mashin* [Machine components]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 496 p. (in Russ.).
17. Xu X., Dong P., Liu Y., Zhang H. Progress in automotive transmission technology. *Automotive Innovation*, 2018, vol. 1, pp. 187–210. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42154-018-0031-y>.