
УДК 629.3

В. П. Тарасик, О. В. Пузанова

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
И ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ**

UDC 629.3

V. P. Tarasik, O. V. Puzanova

**PROCEDURE FOR DETERMINING MAIN PARAMETERS AND
CHARACTERISTICS OF AN ELECTRIC VEHICLE**

Аннотация

Предложена методика определения энергетических параметров электромотоцикла и оценки показателей его тягово-скоростных свойств. Применение методики показано на примере грузового электромотоцикла, предназначенного для городских перевозок. Приведены графики полученных характеристик. Показана необходимость применения автоматической многоступенчатой коробки передач в составе механической трансмиссии электромотоцикла.

Ключевые слова:

электромотоцикл, тяговый электродвигатель, механическая трансмиссия, автоматическая коробка передач, характеристики электродвигателя, параметры трансмиссии, показатели тягово-скоростных свойств.

Abstract

A method is proposed to determine the energy parameters of an electric vehicle and to estimate the indicators of its traction and speed properties. The application of the methodology is exemplified by an electric freight vehicle designed for urban transportation. The graphs of the obtained characteristics are presented. The necessity to use an automatic multistage gearbox as part of the mechanical transmission of an electric vehicle is shown.

Keywords:

electric vehicle, traction motor, mechanical transmission, automatic gearbox, electric motor characteristics, transmission parameters, indicators of traction and speed properties.

Одним из эффективных направлений снижения загрязнения окружающей среды является применение в конструкциях автомобилей электропривода. Используются два варианта решения этой проблемы: *электромотоциклы* и *автомобили с комбинированным источником энергии (КИЭ)*. Автомобили с КИЭ принято называть *гибридными*. Электромотоциклы более перспективны. Сдерживающим фактором их распространения является ограниченная емкость современных накопителей электроэнергии – аккумуляторных батарей. Поэтому

они наиболее эффективны при использовании в городских условиях. Гибридные автомобили такого ограничения не имеют.

Структурная схема электромотоцикла показана на рис. 1. Основные конструктивные элементы электромотоцикла: аккумуляторная батарея АБ (накопитель электроэнергии); тяговый электродвигатель ТЭД; механическая трансмиссия МТ; бортовое зарядное устройство БЗУ; инвертор И; преобразователь постоянного тока ППТ; электронная система управления ЭСУ; система датчиков СД.

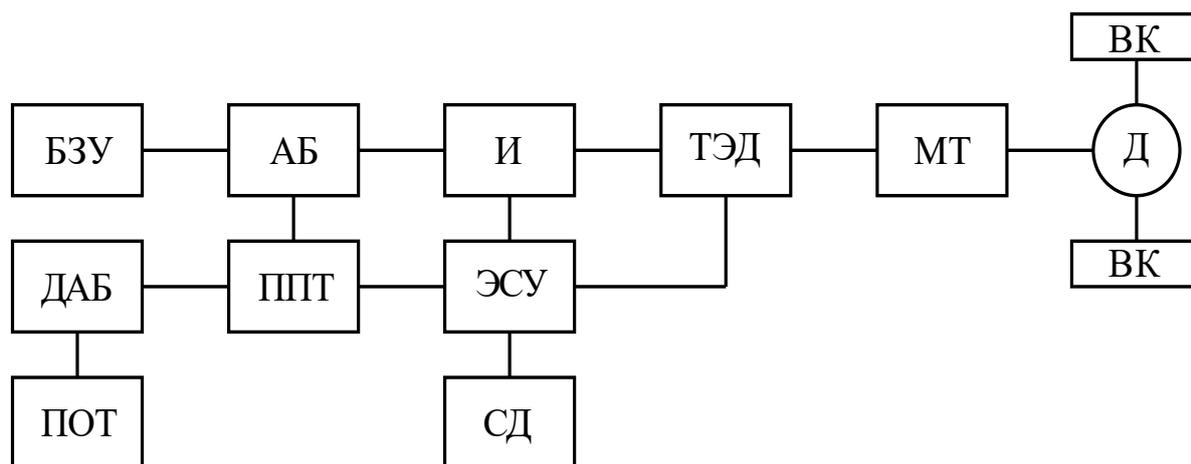


Рис. 1. Структурная схема электромобиля

Используются в основном литий-ионные аккумуляторные батареи с напряжением постоянного тока 300 В. В качестве двигателей применяют трехфазные синхронные и асинхронные электрические машины переменного тока. Инвертор преобразует высокое напряжение аккумуляторной батареи АБ в трехфазное напряжение переменного тока, необходимое для питания ТЭД. Преимущества электродвигателя: непрерывное гиперболическое изменение вращающего момента во всем диапазоне рабочих скоростей; работа в прямом и обратном направлениях без дополнительных устройств; простота конструкции; воздушное охлаждение; возможность работы в режиме генератора; КПД электродвигателя не менее 90 % (против 30 % у ДВС).

Трансмиссия электромобиля МТ представляет собой различные комбинации зубчатых редукторов в блоке с межколесным дифференциалом Д.

Преобразователь постоянного тока ПИТ предназначен для зарядки дополнительного аккумулятора ДАБ напряжением 12 В и питания различных потребителей ПОТ (электроусилитель рулевого управления, отопитель салона, кондиционер, система освещения, стеклоочистители, аудиосистема).

Электронная система управления ЭСУ выполняет функции, направленные на обеспечение безопасности, энергосбережения и комфорта пассажиров (управление высоким напряжением, регулирование тяговой характеристики, обеспечение оптимального режима движения, управление плавным ускорением и рекуперативным торможением, контроль использования электроэнергии, оценка заряда батареи). Система располагает комплексом датчиков СД, доставляющих информацию о положениях педали акселератора и педали тормоза, селектора направления движения (вперед, реверс), давления в тормозной системе, степени зарядки аккумулятора. На основании сигналов датчиков блок управления обеспечивает оптимальные для конкретных условий характеристики движения электромобиля. Рекуперация возвращает до 30 % энергии от уровня затрачиваемой на тяговом режиме.

Предусмотрены два режима зарядки аккумуляторной батареи – нормальный и ускоренный. Нормальный осуществляется от бытовой электросети мощностью 3...3,5 кВт. Время полной зарядки 8 ч. Ускоренная зарядка выполняется на специальных зарядных станциях мощностью до 50 кВт. Время зарядки до 80 % емкости батареи – не более 30 мин.

Цель исследования

Разработка методики определения энергетических параметров электромобиля и оценки показателей его тягово-скоростных свойств.

Методика исследования

Мощность электродвигателя $P_{\text{эдв}}$ (Вт), необходимая для движения электромобиля с максимальной заданной скоростью v_{max} в характерных дорожных условиях, определяется по формуле

$$P_{\text{эдв}} = \frac{m_a g \psi_v + k_w A_{\text{л}} v_{\text{max}}^2}{\eta_{\text{эд}} \eta_{\text{тр}}} v_{\text{max}}, \quad (1)$$

где m_a – полная масса автомобиля, кг; k_w – коэффициент сопротивления воздуха, $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; $A_{\text{л}}$ – лобовая площадь автомобиля, м^2 ; v_{max} – максимальная скорость, м/с; $\eta_{\text{эд}}$ – КПД электродвигателя на номинальном скоростном режиме; $\eta_{\text{тр}}$ – КПД механической части трансмиссии; ψ_v – коэффициент суммарного дорожного сопротивления при скорости v_{max} ,

$$\psi_v = f_v + h_v, \quad (2)$$

где f_v – коэффициент сопротивления качению при v_{max} [1]; h_v – значение продольного дорожного уклона для заданных модельных условий работы автомобиля.

Для легковых автомобилей и дорожных грузовых принимают $h_v = 0$ (движение на горизонтальном участке дороги).

По величине $P_{\text{эдв}}$ из каталога выпускаемой продукции выбирается подходящий электродвигатель с номиналь-

ными значениями мощности $P_{\text{эд.ном}}$ и частоты вращения $n_{\text{эд.ном}}$. Фиксируются также значения максимального вращающего момента электродвигателя $M_{\text{эдmax}}$ и соответствующее ему значение частоты вращения $n_{\text{эдmin}}$.

На электромобилях используют высокоскоростные электродвигатели переменного тока (синхронные и асинхронные) с частотой вращения $n_{\text{эд.ном}}$ в пределах 10000...20000 об/мин [2, 3]. Рабочий диапазон частот вращения при изменении момента от $M_{\text{эдmax}}$ до номинальной величины $M_{\text{эд.ном}}$ характеризуется соотношением $n_{\text{эд.ном}}/n_{\text{эдmin}} = 3,5 \dots 4$. Диапазон изменения рабочей скорости автомобилей гораздо шире, особенно легковых автомобилей. Согласно техническим требованиям на тягово-скоростные свойства автомобиль должен обеспечивать заданную максимальную скорость движения v_{max} и максимальный динамический фактор D_{max} . Эти требования противоречивы. Выполнить их одновременно при использовании одноступенчатого редуктора трансмиссии практически невозможно. Это очевидно: для получения v_{max} передаточное число редуктора $u_{\text{тр}}$ необходимо снижать, а для D_{max} , наоборот, повышать [1].

Требуемое значение D_{max} можно получить, применив электродвигатель большей мощности, чем необходимо для обеспечения v_{max} . Но это приведет к увеличению его массы и снижению КПД на высоких скоростях движения электромобиля.

Для эффективного использования энергетических характеристик тягового электродвигателя возникает необходимость применения в составе механической части трансмиссии электромобиля

многоступенчатой автоматической коробки передач.

Передаточное число механической части трансмиссии на высшей ступени коробки передач $u_{\text{тр.в}}$ найдем из условия движения со скоростью v_{max} при $n_{\text{эд.ном}}$:

$$u_{\text{тр.в}} = \frac{\pi n_{\text{эд.ном}} r_{\text{к0}}}{30 v_{\text{max}}}, \quad (3)$$

где $r_{\text{к0}}$ – радиус качения колес, м.

Передаточное число трансмиссии на низшей ступени коробки передач $u_{\text{тр.н}}$ определяется из условия преодоления максимального сопротивления движению, характеризуемого коэффициентом суммарного дорожного сопротивления $\psi_{\text{max}} = f_0 + h_{\text{max}}$, где f_0 – коэффициент сопротивления качению при малой скорости; h_{max} – максимальный преодолеваемый уклон дороги. Согласно ГОСТ Р 52280–2004 для одиночных автомобилей $\psi_{\text{max}} = 0,25$, для автопоездов $\psi_{\text{max}} = 0,18$.

Передаточное число $u_{\text{тр.н}}$ определим по формуле

$$u_{\text{тр.н}} = \frac{m_a g \psi_{\text{max}} r_{\text{к0}}}{M_{\text{эдmax}} \eta_{\text{эд}} \eta_{\text{тр}}}. \quad (4)$$

Диапазон передаточных чисел коробки передач

$$D_{\text{кп}} = u_{\text{тр.н}} / u_{\text{тр.в}}. \quad (5)$$

При равномерном распределении передаточных чисел коробки передач

$$M_{\text{эд}} = \begin{cases} M_{\text{эдmax}} & \text{при } 0 \leq n_{\text{эд}} \leq n_{\text{эдmin}}; \\ \frac{30 P_{\text{эд.ном}}}{\pi n_{\text{эд}}} & \text{при } n_{\text{эдmin}} < n_{\text{эд}} \leq n_{\text{эдmax}}; \end{cases} \quad (9)$$

количество ступеней $n_{\text{кп}}$ зависит от выбора показателя средней плотности ряда передаточных чисел $q_{\text{ср}}$. Значение $q_{\text{ср}}$ связано с $D_{\text{кп}}$ и $n_{\text{кп}}$ выражением

$$q_{\text{ср}} = n_{\text{кп}}^{-1} \sqrt[n_{\text{кп}}]{D_{\text{кп}}} = n_{\text{кп}}^{-1} \sqrt[n_{\text{кп}}]{u_{\text{тр.н}} / u_{\text{тр.в}}}. \quad (6)$$

Используя это выражение, получаем формулу для определения $n_{\text{кп}}$

$$n_{\text{кп}} = 1 + \frac{\ln D_{\text{кп}}}{\ln q_{\text{ср}}} = 1 + \frac{\ln u_{\text{тр.н}} - \ln u_{\text{тр.в}}}{\ln q_{\text{ср}}}. \quad (7)$$

Значение $n_{\text{кп}}$ округляют до целого в ту или иную сторону и затем вычисляют $q_{\text{ср}}$ по формуле (6). Используя $q_{\text{ср}}$, определяют передаточные числа трансмиссии на всех ступенях коробки передач $u_{\text{тр}i}$, $i = 1, 2, \dots, n_{\text{кп}}$, где $n_{\text{кп}}$ – номер высшей ступени коробки передач.

Передаточные числа трансмиссии связаны между собой соотношением

$$u_{\text{тр}i} = u_{\text{тр}i-1} / q_{\text{ср}}. \quad (8)$$

Например, при трехступенчатой коробке передач в трансмиссии автомобиля ее передаточные числа составят следующий ряд: $u_{\text{тр}1} = u_{\text{тр.н}}$; $u_{\text{тр}2} = u_{\text{тр}1} / q_{\text{ср}}$; $u_{\text{тр}3} = u_{\text{тр.в}}$.

Характеристики вращающего момента $M_{\text{эд}} = f(n_{\text{эд}})$ и мощности $P_{\text{эд}} = f(n_{\text{эд}})$ тягового электродвигателя вычисляются на основе выражений

$$P_{\text{эд}} = M_{\text{эд}} \pi n_{\text{эд}} / 30. \quad (10)$$

Мощность $P_{\text{эд}}$ по формуле (10) получается в ваттах.

Скорости движения электромобиля (км/ч) на высшей $v_{\text{ав}}$ и низшей $v_{\text{ан}}$ передачах определяются по формулам

$$v_{\text{ав}} = \frac{3,6\pi n_{\text{эд}} r_{\text{к0}}}{30 u_{\text{тр.в}}}; \quad (11)$$

$$v_{\text{ан}} = \frac{3,6\pi n_{\text{эд}} r_{\text{к0}}}{30 u_{\text{тр.н}}}. \quad (12)$$

Характеристики силы тяги $F_{\text{ТВ}} = f(v_{\text{ав}})$, развиваемой на осях ведущих колес, динамического фактора $D_{\text{в}} = f(v_{\text{ав}})$ и ускорения автомобиля $a_{\text{в}} = f(v_{\text{ав}})$ при движении электромобиля на высшей передаче определяются по формулам

$$F_{\text{ТВ}} = M_{\text{эд}} u_{\text{тр.в}} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{эд}} / r_{\text{к0}}; \quad (13)$$

$$D_{\text{в}} = \frac{F_{\text{ТВ}} - k_w A_{\text{л}} v_{\text{ав}}^2}{m_a g}; \quad (14)$$

$$a_{\text{в}} = (D_{\text{в}} - \psi_v) g / \delta_{\text{п.м.в}}, \quad (15)$$

где $\delta_{\text{п.м.в}}$ – коэффициент приведенной массы на высшей ступени коробки передач, учитывающий влияние вращающихся масс механической трансмиссии на величину кинетической энергии автомобиля [1].

При движении на низшей передаче формулы для вычисления этих же характеристик аналогичны:

$$F_{\text{тн}} = M_{\text{эд}} u_{\text{тр.н}} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{эд}} / r_{\text{к0}}; \quad (16)$$

$$D_{\text{н}} = \frac{F_{\text{тн}} - k_w A_{\text{л}} v_{\text{ан}}^2}{m_a g}; \quad (17)$$

$$a_{\text{н}} = (D_{\text{н}} - \psi_v) g / \delta_{\text{п.м.н}}. \quad (18)$$

В формулах (14) и (17) скорости $v_{\text{ав}}$ и $v_{\text{ан}}$, м/с.

Для оценки тягово-скоростных свойств электромобиля необходимо построить характеристики его разгона и определить показатели эффективности, предусмотренные ГОСТ 22576–90.

Движение электромобиля при разгоне описывается системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \frac{F_{\text{Т}} - m_a g f_v - k_w A_{\text{л}} v^2}{\delta_{\text{п.м}} m_a}; \\ \frac{ds}{dt} &= v; \\ \frac{dW}{dt} &= \frac{M_{\text{эд}} u_{\text{тр}} v}{r_{\text{к0}}}, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где W – изменение затраты энергии электродвигателем в процессе разгона электромобиля, Дж.

Характеристика силы тяги ведущих колес электромобиля $F_{\text{Т}}$ в процессе разгона изменяется в зависимости от скоростного режима тягового электродвигателя и номера ступени коробки передач трансмиссии. Режим работы электродвигателя характеризуется вращающим моментом $M_{\text{эд}}$ и частотой вращения $n_{\text{эд}}$. Интегрирование системы уравнений (19) позволяет построить характеристики разгона $v = f(t)$, $s = f(t)$ и затраты энергии электродвигателя на разгон $W = f(t)$.

Результаты исследования

Рассмотрим графики изменения $P_{\text{эд}} = f(n_{\text{эд}})$, $M_{\text{эд}} = f(n_{\text{эд}})$ и $F_{\text{Т}} = f(v)$ на конкретном примере. Предположим, что исследуемый электромобиль грузовой, предназначенный для работы в городских условиях. Его параметры: пол-

ная масса $m_a = 10000$ кг; максимальная скорость 80 км/ч; радиус качения колес $r_{к0} = 0,39$ м; лобовая площадь $A_{л} = 5$ м²; коэффициент сопротивления воздуха $k_w = 0,4$ Н·с²/м⁴; коэффициент сопротивления качению при малой скорости $f_0 = 0,012$.

Примем следующие параметры характеристик электродвигателя и трансмиссии электромобиля: номинальная и минимальная частоты вращения электродвигателя $n_{эд,ном} = 10000$ об/мин, $n_{эд,мин} = 2500$ об/мин; КПД электродвигателя и механической трансмиссии $\eta_{эд} = 0,94$ и $\eta_{тр} = 0,922$ соответственно.

По формуле (1) определим необходимую мощность электродвигателя $P_{эдв}$ для проектируемого электромобиля: $P_{эдв} = 62,463$ кВт. Округляем полученное значение и принимаем величину номинальной мощности $P_{эд,ном} = 65$ кВт. Максимальный мо-

мент электродвигателя $M_{эдmax}$ будет при $n_{эдmin}$. Его значение вычисляется по формуле

$$M_{эдmax} = \frac{30P_{эд,ном}}{\pi n_{эдmin}}. \quad (20)$$

Так как исследуемый электромобель сравнительно тихоходный, ограничимся двухступенчатой коробкой передач. Передаточные числа трансмиссии определим по формулам (3) и (4): $u_{тр,н} = 44,450$; $u_{тр,в} = 18,378$.

По формулам (9) и (10) вычисляем характеристики $M_{эд} = f(n_{эд})$ и $P_{эд} = f(n_{эд})$. При изменении частоты вращения электродвигателя в пределах $n_{эдmin} \leq n_{эд} \leq n_{эд,ном}$ его вращающий момент изменяется по гиперболе, а мощность остается постоянной, равной $P_{эд,ном}$. Графики этих характеристик представлены на рис. 2, а.

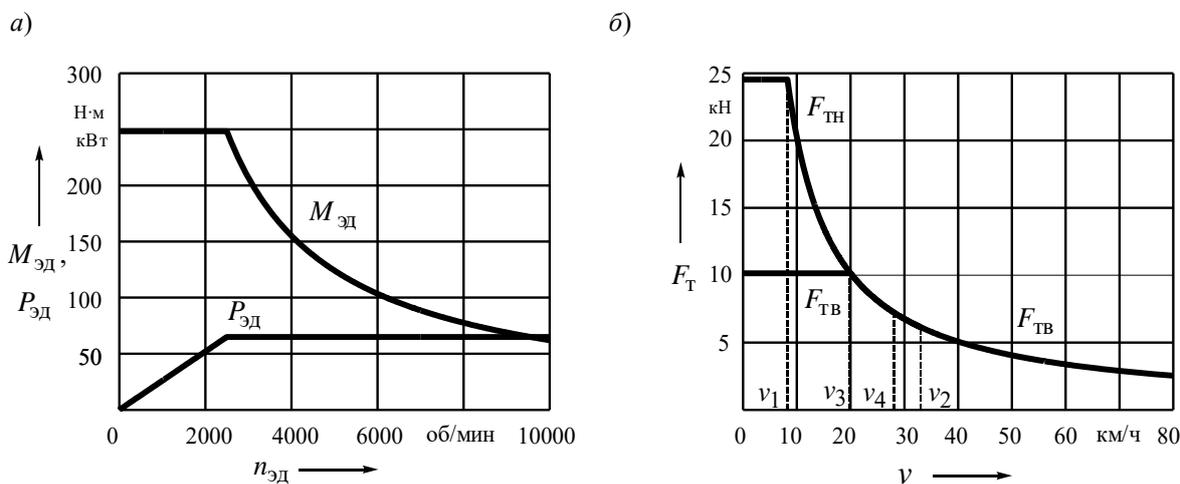


Рис. 2. Графики характеристик электродвигателя (а) и тяговая характеристика электромобиля (б)

Скорости движения на высшей $v_{ав}$ и низшей $v_{ан}$ передачах в зависимости от изменения частоты вращения электродвигателя определяются по формулам (11) и (12), а соответствую-

щие им значения силы тяги $F_{тв}$ и $F_{тн}$ — по формулам (13) и (16). Полученные графики тяговых характеристик электромобиля изображены на рис. 2, б. В процессе разгона электромобиля по-

сле достижения скорости v_2 происходит автоматическое переключение на высшую передачу. При увеличении дорожного сопротивления и снижении по этой причине скорости движения до $v \leq v_4$ (например, при преодолении

подъема) автоматически включается низшая передача.

На рис. 3, а представлен график динамического фактора автомобиля $D = f(v)$, а на рис. 3, б – график ускорения $a = f(v)$.

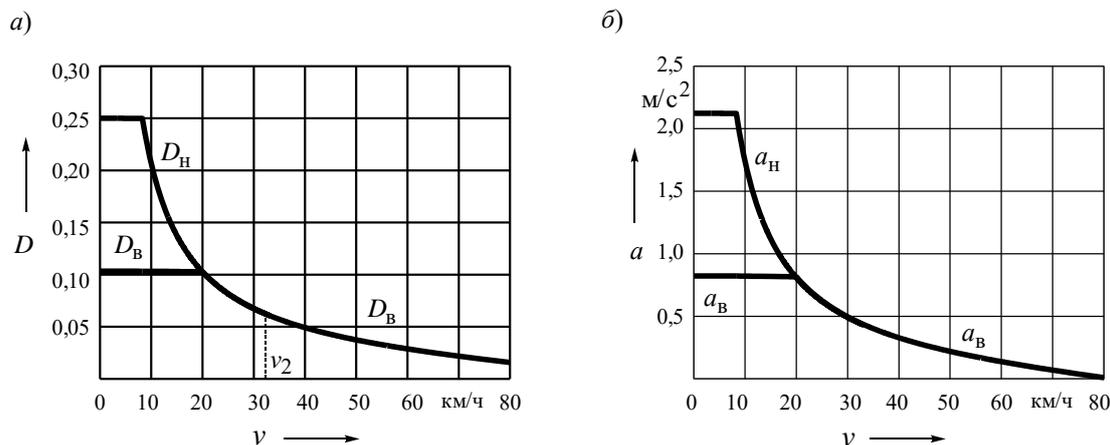


Рис. 3. Динамическая характеристика электромобиля (а) и характеристика ускорения (б)

При моделировании разгона электромобиля необходимо на каждом шаге интегрирования системы дифференциальных уравнений (19) вычислять силу тяги F_T . Но сила тяги, согласно выражениям (13) и (16), зависит от вращающего момента электродвигателя $M_{эд}$, который изменяется в зависимости от частоты вращения $n_{эд}$ в соответствии с

выражением (9). При этом функция $M_{эд} = f(n_{эд})$ неоднозначная, состоящая из двух разнородных составляющих, что требует определения координаты точки перехода между ними. В связи с изложенным алгоритм вычислений переменных $n_{эд}$, $M_{эд}$ и F_T включает следующую систему нелинейных функций:

$$n_{эд} = \begin{cases} 30u_{тр.н}v/(\pi r_{к0}) & \text{при } v \leq v_2; \\ 30u_{тр.в}v/(\pi r_{к0}) & \text{при } v > v_2; \end{cases} \quad (21)$$

$$M_{эд} = \begin{cases} M_{эдmax} & \text{при } v \leq v_1; \\ 30P_{эд.ном}/(\pi n_{эд}) & \text{при } v > v_1; \end{cases} \quad (22)$$

$$F_T = \begin{cases} M_{эд}u_{тр.н}\eta_{тр}\eta_{эд}/r_{к0} & \text{при } v \leq v_2; \\ M_{эд}u_{тр.в}\eta_{тр}\eta_{эд}/r_{к0} & \text{при } v > v_2. \end{cases} \quad (23)$$

Пороговые значения скорости v_1 и v_2 отмечены на рис. 2, б: v_1 соответствует частоте вращения электродвигателя $n_{эд\min}$ в точке перехода от $M_{эд\max}$ на гиперболическую ветвь момента на низшей передаче; v_2 – скорость электромобиля, при которой происходит переключение на высшую ступень коробки передач.

Графики характеристик разгона моделируемого электромобиля представлены на рис. 4, а и б. На них отмечены показатели его тягово-скоростных

свойств: t_{400} – время разгона на участке пути 400 м; t_{1000} – время разгона на участке 1000 м; t_v – время разгона до скорости 50 км/ч; $v_{к\max}$ – конечная скорость на мерном участке 2000 м; $v_{у\max}$ – условная максимальная скорость, $v_{у\max} = 400/t_y$ [1].

Значения показателей тягово-скоростных свойств электромобиля приведены в табл. 1.

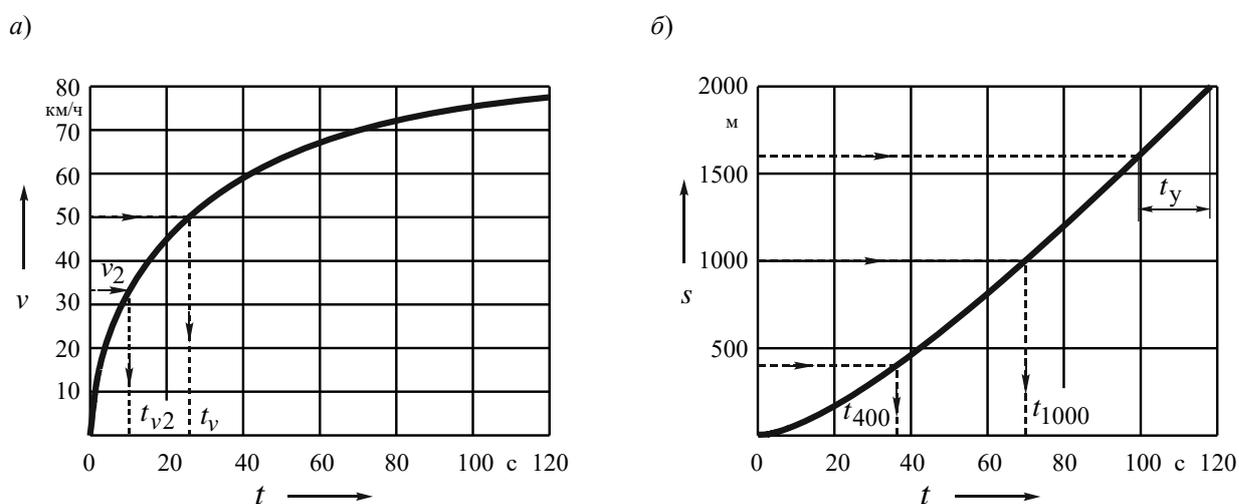


Рис. 4. Графики разгона электромобиля: а – скорость v ; б – перемещение s

Табл. 1. Показатели тягово-скоростных свойств электромобиля

t_{400}, c	t_{1000}, c	t_v, c	$v_{к\max}, км/ч$	$v_{у\max}, км/ч$
36,2	70,0	25,87	77,4	75,54

Для грузового автомобиля, используемого в городских условиях, значения полученных показателей вполне приемлемые.

Приведенные на рис. 2–4 графики характеристик получены при постоянном значении КПД электродвигателя $\eta_{эд} = 0,94$. Однако на самом деле КПД электродвигателя существенно зависит от нагрузки и частоты вращения электродвигателя.

Представление об этих зависимостях можно составить на основе электромеханической характеристики электродвигателя автомобиля Nissan Leaf [3]. Используя данную характеристику, определим зависимость КПД электродвигателя при двух уровнях нагрузки: 100 и 50 %. Для этих условий получены уравнения регрессии пятого порядка

$$\eta_{эд} = b_0 + b_1 n_{эд}^* + b_2 (n_{эд}^*)^2 + b_3 (n_{эд}^*)^3 + b_4 (n_{эд}^*)^4 + b_5 (n_{эд}^*)^5, \quad (24)$$

где $\eta_{эд}$ – КПД электродвигателя;
 $n_{эд}^*$ – относительная частота вращения электродвигателя, $n_{эд}^* = n_{эд} / n_{эд,ном}$;
 b_0, b_1, \dots, b_5 – коэффициенты регрессии.

При полной нагрузке $b_0 = 0,78397$; $b_1 = 0,42583$; $b_2 = 0,4430$;
 $b_3 = -2,3895$; $b_4 = 2,7798$; $b_5 = -1,1038$.
 При нагрузке 50 % $b_0 = 0,73565$;
 $b_1 = 1,3006$; $b_2 = -2,9282$; $b_3 = 2,7782$;

$$b_4 = -0,86239 ; b_5 = -0,1023.$$

На рис. 5 графики КПД при нагрузке 100 % обозначены $\eta_{эд}^{100}$, а при нагрузке 50 % – $\eta_{эд}^{50}$. Сплошные линии – исходные данные, штриховые – по уравнениям регрессии (24).

Из рис. 5 следует, что снижение нагрузки электродвигателя приводит к повышению его КПД при низких значениях частоты вращения $n_{эд}$, соответствующих максимальному моменту $M_{эд,мах}$, что обусловлено уменьшением тепловых потерь, но при этом снижается КПД в области высоких значений $n_{эд}$, характерных для эксплуатационных режимов движения.

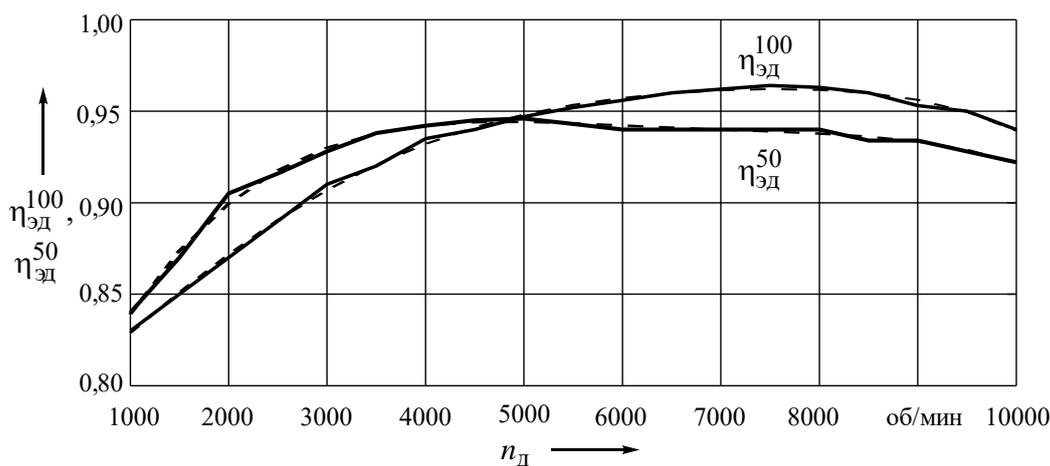


Рис. 5. Графики зависимостей КПД электродвигателя от уровня нагрузки

Приведенные графики подтверждают целесообразность и эффективность применения многоступенчатой коробки передач в составе механической трансмиссии электромобиля.

Важным положительным свойством электромобиля является рекуперативный режим торможения, позволяющий использовать накопленную кинетическую энергию разгона. Для оценки эффективности этого режима рассмот-

рим пример. Примем интервал движения между остановками $s_k = 1,5$ км. Автомобиль вначале интенсивно разгоняется до скорости $v = 60$ км/ч, затем движется с постоянной скоростью и заканчивает движение на режиме электродинамического торможения. На режиме разгона используем уравнения (19). Графики, отображающие затраты энергии за время разгона W_p , представлены на рис. 6.

При равномерном движении затраты энергии вычисляется по формуле

$$W_{p.d} = \frac{(m_a g f_v + k_w A_l v^2) s_{p.d}}{\eta_{эд} \eta_{тр}}, \quad (25)$$

где $s_{p.d}$ – длина пути равномерного движения, м.

Энергия рекуперации, поступающая в накопитель электромобиля,

$$W_{рек} = (E_{к.н} - E_{к.к}) \eta_{эд} \eta_{тр} = 0,5 m_a \delta_{п.м} (v_n^2 - v_k^2) \eta_{эд} \eta_{тр}, \quad (26)$$

где $E_{к.н}$, $E_{к.к}$ – начальное и конечное значения кинетической энергии электромобиля; v_n , v_k – начальная и конечная скорости на режиме рекуперации, м/с.

Энергия по формулам (25) и (26) вычисляется в джоулях.

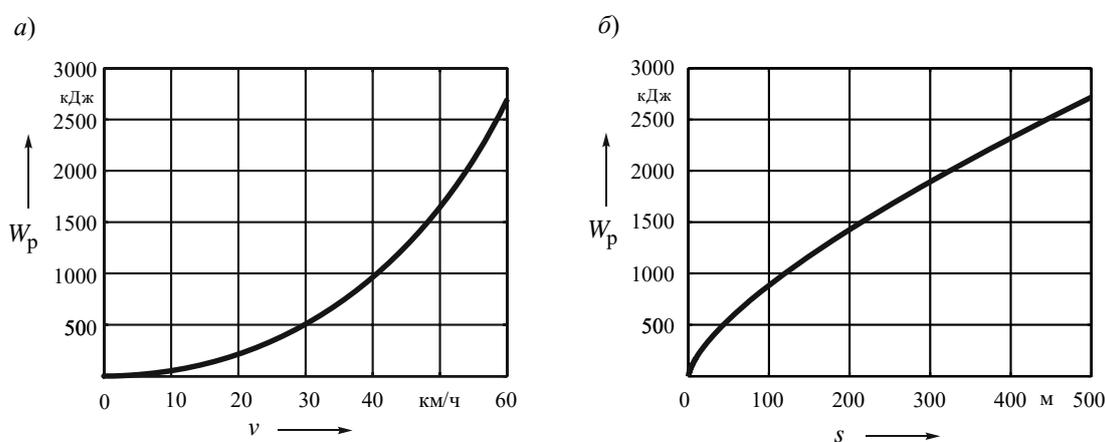


Рис. 6. Затрата энергии на режиме разгона: а – в зависимости от скорости; б – от перемещения

В рассмотренном примере затраты энергии на разгон и перемещение на участке маршрута составили $W_p + W_{p.d} = 2710 + 2175 = 4885$ кДж, а энергия рекуперации $W_{рек} = 1276$ кДж. В результате эффективность рекуперации оказалась равной 26,1 %.

Заключение

1. Разработана методика определения энергетических параметров электромобиля и оценки показателей его тягово-скоростных свойств. Предложены формулы определения необходимой

мощности электродвигателя, получения тяговой характеристики и характеристик разгона электромобиля.

2. Показано, что для выполнения технических требований на тягово-скоростные свойства электромобиля в механической части его трансмиссии необходимо использовать многоступенчатую коробку передач с автоматической системой управления.

3. На примере грузового электромобиля показана высокая эффективность его использования в городских условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасик, В. П.** Теория движения автомобиля: учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.
2. Применение коробок передач в силовых приводах электротранспорта / С. Н. Поддубко [и др.]. – Механика машин и материалов. – 2020. – № 3 (52). – С. 5–10.
3. **Laitinen, H.** Improving electric vehicle energy efficiency with two-speed gearbox: abstract of thesis ... for the degree of master of science in technology / H. Laitinen. – Espoo, 2017. – 59 p.

Статья сдана в редакцию 8 сентября 2020 года

Владимир Петрович Тарасик, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-222-25-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

Ольга Владимировна Пузанова, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-29-634-57-04.

Vladimir Petrovich Tarasik, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-222-25-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

Olga Vladimirovna Puzanova, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-29-634-57-04.