

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-41-53

УДК 621.313

Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электромобиля

Нго Фыонг Ле¹⁾, Г. И. Гульков¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Основным показателем механической системы транспортного средства, отражающим его главные эксплуатационные свойства, является тяговая характеристика электромобиля. Реализация данной характеристики обеспечивается соответствующим регулированием угловой скорости и момента тягового электродвигателя в системе автоматического регулирования. Статическая механическая характеристика тягового электродвигателя в системе автоматического регулирования – важнейшее свойство, которое определяет массогабаритные и эксплуатационные показатели электродвигателя и служит основой для его проектирования. Осуществлен анализ наиболее распространенных вариантов конструктивного исполнения тягового электропривода с выбором его схемы для дальнейшего проектирования. Применительно к механической системе электромобиля с одной степенью свободы записано уравнение Лагранжа в обобщенных координатах. Для определения обобщенной силы вычислена элементарная работа всех моментов, действующих на движущийся автомобиль. Получены уравнение движения электромобиля, соответствующее расчетной схеме, и выражения для расчета характерных точек статической механической характеристики тягового электродвигателя: максимального и минимального моментов, минимальной мощности. Разработана методика для определения номинальных значений угловой скорости и мощности тягового электродвигателя. Методика позволяет осуществить расчет точек механической характеристики тягового электродвигателя при минимально возможной номинальной мощности. Приведен алгоритм расчета механической характеристики электродвигателя. На основе разработанной методики осуществлен расчет требуемой статической механической характеристики тягового электродвигателя для городского грузового электромобиля малой грузоподъемности.

Ключевые слова: электромобиль, математическая модель, тяговая характеристика, статическая механическая характеристика

Для цитирования: Фыонг Ле, Нго. Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электромобиля / Нго Фыонг Ле, Г. И. Гульков // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 1. С. 41–53. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-41-53

Адрес для переписки

Гульков Геннадий Игнатьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/11,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-61
eapu@bntu.by

Address for correspondence

Gulkov Genadiy I.
Belarusian National Technical University
65/11 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-61
eapu@bntu.by

Calculation of a Mechanical Characteristic of Electric Traction Motor of Electric Vehicle

Ngo Phuong Le¹⁾, G. I. Gulkov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The traction characteristic of an electric vehicle is the main characteristic of mechanical system that reflects its key performance indicators. Implementation of the traction characteristic is based on controlling angular speed and torque of electric traction motor in an automatic control system. The static mechanical characteristic of an electric traction motor in an automatic control system is the most important characteristic that determines weight, size and operating characteristics of an electric traction motor and serves as the basis for design. The most common variants of constructive implementation of a traction electric drive are analyzed, and a scheme is chosen for further design. Lagrange's equation for electric mechanical system with one degree of freedom is written in generalized coordinates. In order to determine the generalized forces, elementary operation of all moments influencing on a moving car has been calculated. The resulting equation of motion of the electric vehicle corresponding to the design scheme, as well as the expressions for calculation of characteristic points of static mechanical characteristics of traction motor (i.e. the maximum and minimum time, minimum power) are obtained. In order to determine the nominal values of the angular velocity and the power of electric traction motor, a method based on ensuring the movement of the vehicle in the standard cycle has been developed. The method makes it possible to calculate characteristic points of the mechanical characteristic with the lowest possible power rating. The algorithm for calculation of mechanical characteristics of the motor is presented. The method was applied to calculate static mechanical characteristic of an electric traction motor for a small urban electric truck.

Keywords: electric vehicle, mathematic model, traction characteristic, static mechanical characteristic

For citation: Phuong Le Ngo, Gulkov G. I. (2017) Calculation of a Mechanical Characteristic of Electric Traction Motor of Electric Vehicle. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (1), 41–53. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-41-53 (in Russian).

Введение

Потребность в оздоровлении экологической обстановки окружающей среды и энергетический кризис вызвали ускоренное развитие транспортных средств с тяговым электроприводом (ТЭД). Для приведения в движение транспортных средств используются три вида привода:

- с двигателем внутреннего сгорания (ДВС);
- с двигателем внутреннего сгорания и электрическим;
- с электрическим двигателем (ЭД).

Благодаря своим механическим характеристикам электродвигатель по сравнению с двигателем внутреннего сгорания позволяет обеспечить высокий тяговый момент при низкой скорости транспортного средства, широкий диапазон регулирования скорости, рекуперативное торможение ЭД при снижении скорости транспортного средства. Помимо этого, при остановке транспортного средства отпадает необходимость во вращении электродвигателя, чем исключаются потери холостого хода. Использование указанных преимуществ ЭД дает возможность создавать более компактные и эффективные в энергетическом отношении электрические транспортные средства – электромобили.

К тяговому электроприводу предъявляются следующие основные требования [1–3]:

- точная реализация тяговой характеристики электромобиля во всем диапазоне изменения тягового усилия и скорости от минимальных значений до максимальных;
- высокий КПД во всем диапазоне изменения тягового усилия и скорости, включая максимальные значения;
- высокий КПД для режима рекуперативного торможения;
- минимально возможные масса и габариты;
- приемлемая стоимость.

Тяговая характеристика электромобиля представляет собой зависимость тягового усилия на ведущих колесах от скорости движения электромобиля. Реализация данной характеристики обеспечивается соответствующим регулированием угловой скорости ω и момента M ТЭД в системе автоматического регулирования. Статическая механическая характеристика тягового электродвигателя в системе автоматического регулирования (САР) $M = f(\omega)$ – важнейшее свойство для проектирования ТЭД, так как номинальный электромагнитный момент определяет геометрические размеры машины и ее массу.

Цель работы – создание методики расчета механической характеристики тягового электродвигателя электромобиля.

Математическая модель механической системы электромобиля

Тяговый электропривод (ТЭП) электромобиля (рис. 1) в общем случае структурно содержит источник электрической энергии (ИЭЭ), ЭД и механическое передаточное устройство (механическую трансмиссию – МТ), передающее механическое усилие от двигателя к ведущему валу (ВВ) электромобиля.

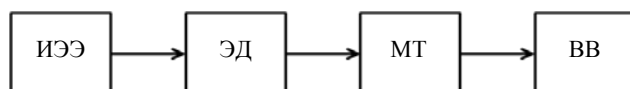


Рис. 1. Схема тягового электропривода электромобиля

Fig. 1. The scheme of the traction electric drive of electric vehicle

На основании анализа рассмотренных схем ТЭП электромобиля [4] для проектирования и реализации выбрана схема, представленная на рис. 2, отличающаяся простотой механической части, повышенным КПД, высокими массогабаритными показателями электропривода, а также повышенной надежностью. Для математического описания динамических процессов в механической части электропривода используются уравнения движения в обобщенных координатах – уравнения Лагранжа [5, 6]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial W_k}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$

где W_k – запас кинетической энергии системы, выраженный через обобщенные координаты q_i и обобщенные скорости \dot{q}_i ; $Q_i = \delta A_i / \delta q_i$ – обобщен-

ная сила, определяемая суммой элементарных работ δA_i всех действующих сил на возможном перемещении δq_i .

За обобщенную координату q_i в электроприводе, как правило, принимается угловое перемещение ϕ вала ЭД, к которому приводятся параметры всех механических звеньев механической системы [5, 6]. Применительно к механической системе электромобиля с одной степенью свободы и обобщенной координатой углом ϕ поворота вала ТЭД уравнение (1) запишем в виде

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_3}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial W_3}{\partial \phi} = Q, \quad (2)$$

где W_3 – запас кинематической энергии электромобиля; $\dot{\phi}$ – угловая скорость вала тягового электродвигателя; Q – обобщенная сила, действующая на перемещении ϕ .

На основании выбранной схемы ТЭД, приведенной на рис. 2, составлена обобщенная расчетная механическая схема электромобиля [7], которая показана на рис. 3.

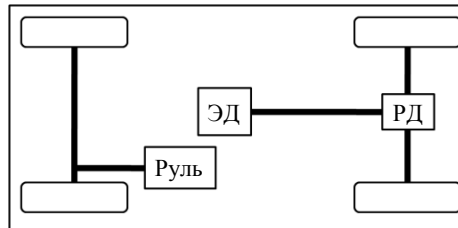


Рис. 2. Схема тягового электродвигателя

Fig. 2. The scheme of the traction motor

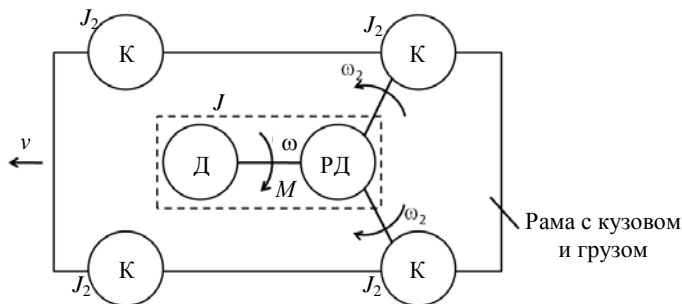


Рис. 3. Расчетная механическая схема электромобиля: v – линейная скорость движения автомобиля; M – момент тягового электродвигателя; ω , ω_2 – угловая скорость тягового электродвигателя с редуктором и колеса; J , J_2 – момент инерции тягового электродвигателя с редуктором и колеса; К – колесо; РД – редуктор и дифференциал; Д – двигатель

Fig. 3. Design mechanical scheme of an electric vehicle: v – is a linear speed of the vehicle; M – torque of the traction motor; ω , ω_2 – is an angular velocity of the traction motor with a reducing gear and of a wheel; J , J_2 – is a moment of inertia of the traction motor with a reducing gear and of a wheel; К – is a wheel; РД – is a reducing gear and differential; Д – is an engine

Получим уравнение движения, соответствующее расчетной схеме на рис. 3. Запас кинетической энергии автомобиля W_3 определяется суммой кинетических энергий ТЭД с редуктором W , рамы автомобиля с кузовом и грузом W_1 и четырех колес $4W_2$

$$W_3 = W + W_1 + 4W_2. \quad (3)$$

Подставив выражения кинематических энергий W , W_1 и W_2 в (3), получим

$$W_3 = \frac{1}{2} \left[(m + m_1 + 4m_2) v^2 + J \omega^2 + 4J_2 \omega_2^2 \right], \quad (4)$$

где m , m_1 , m_2 – масса ТЭД с редуктором, рамы с кузовом и грузом и колеса соответственно; v – линейная скорость движения автомобиля; ω , ω_2 – угловая скорость ТЭД с редуктором и колеса; J , J_2 – момент инерции ТЭД с редуктором и колеса.

Учитывая, что передаточное число редуктора $i = \omega/\omega_2$ и линейная скорость колеса $v = \omega_2 r$, выражение (4) преобразуется к виду

$$W_3 = \frac{1}{2} \left[(m + m_1 + 4m_2) \frac{r^2}{i^2} + J + \frac{4J_2}{i^2} \right] \dot{\phi}^2 = \frac{1}{2} J_\Sigma \dot{\phi}^2, \quad (5)$$

где r – радиус колеса; $\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt} = \omega$; $J_\Sigma = (m + m_1 + 4m_2) \frac{r^2}{i^2} + J + \frac{4J_2}{i^2}$ – суммарный приведенный к валу тягового электродвигателя момент инерции автомобиля.

Для определения обобщенной силы Q необходимо вычислить элементарную работу всех моментов, действующих на движущийся электромобиль, на перемещении $\delta\phi$

$$\delta A = (M - M_{\text{тр.к}} - M_{\text{с.в}} - M_{\text{с.с}} - M_{\text{п}}) \delta\phi, \quad (6)$$

где M – момент ТЭД, $M = f(\omega)$; $M_{\text{тр.к}}$, $M_{\text{с.в}}$, $M_{\text{с.с}}$ – моменты силы трения качения колес, силы сопротивления воздуха, скатывающей силы, приведенные к валу ТЭД; $M_{\text{п}}$ – момент, учитывающий потери на трение в механизмах передачи от ТЭД к колесам.

Из уравнения (6)

$$Q = \frac{\delta A}{\delta\phi} = M - M_{\text{тр.к}} - M_{\text{с.в}} - M_{\text{с.с}} - M_{\text{п}}. \quad (7)$$

Подставив (5) и (7) в (2), после дифференцирования получим уравнение движения автомобиля

$$M - M_{\text{тр.к}} - M_{\text{с.в}} - M_{\text{с.с}} - M_{\text{п}} = J_\Sigma \ddot{\phi} = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}. \quad (8)$$

Определим моменты, действующие на движущийся электромобиль [8]. Момент силы трения качения колес, приведенный к валу ТЭД:

$$M_{\text{тр.к}} = \frac{N\delta}{i}, \quad (9)$$

где $N = G \cos \alpha$ – нормальная составляющая сила тяжести электромобиля на дорогу; α – угол уклона дороги; $G = (m_1 + 4m_2 + m_3)g$ – сила тяжести электромобиля; g – ускорение свободного падения; δ – коэффициент трения качения колес.

Момент силы сопротивления воздуха, приведенный к валу ТЭД:

$$M_{\text{с.в}} = \frac{1}{2} \rho C_d A_f v^2 \frac{r}{i} = \frac{1}{2} \rho C_d A_f \left(\frac{r}{i} \right)^3 \omega^2, \quad (10)$$

где ρ – удельная плотность воздуха; C_d – коэффициент сопротивления; A_f – площадь лобового сопротивления.

Момент скатывающей силы, приведенный к валу ТЭД:

$$M_{\text{с.с}} = G \sin \alpha \frac{r}{i}. \quad (11)$$

Момент, характеризующий потери в узлах трения:

$$M_{\text{п}} = (1 - \eta_{\text{п}}) M, \quad (12)$$

где $\eta_{\text{п}}$ – КПД в механизмах передачи от ТЭД к колесам.

Подставив (9)–(12) в выражение (8), получим уравнение движения электромобиля

$$M\eta_{\text{п}} - \frac{N\delta}{i} - \frac{1}{2} \rho C_d A_f \left(\frac{r}{i} \right)^3 \omega^2 - G \sin \alpha \frac{r}{i} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}. \quad (13)$$

Определение требуемой механической характеристики тягового электродвигателя

Тяговая характеристика электромобиля, представляющая собой зависимость тягового усилия F на ведущих колесах от скорости движения электромобиля, является основной характеристикой механической системы транспортного средства, отражающей его главные эксплуатационные показатели. Типичная тяговая характеристика электромобиля [9], состоящая из трех основных участков, приведена на рис. 4.

Тяговая характеристика электромобиля определяется из выражения:

$$F = \begin{cases} F_{\text{max}} & \text{при } 0 \leq v \leq v_{\text{min}}; \\ \frac{P_{\text{н}} \eta}{v} & \text{при } v_{\text{min}} \leq v \leq v_{\text{max}}; \\ F_{\text{min}} & \text{при } v = v_{\text{max}}, \end{cases} \quad (14)$$

где F_{max} , F_{min} – максимальное и минимальное значения тягового усилия соответственно; $P_{\text{н}}$ – номинальная мощность автономной энергоустановки электромобиля; v_{min} , v_{max} – минимальная и максимальная скорость соответственно; η – КПД передачи энергии от энергоустановки к движителю.

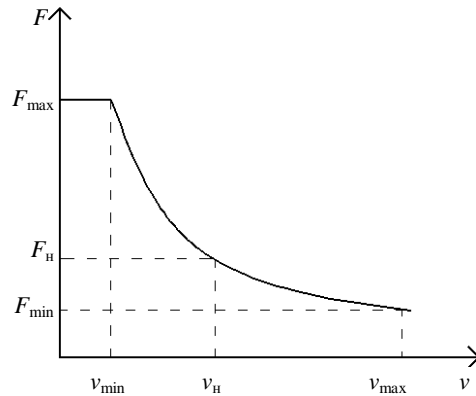


Рис. 4. Типичная тяговая характеристика транспортного средства:
 F_H – номинальное значения тягового усилия; v_H – номинальная скорость

Fig. 4. A typical traction characteristic of a vehicle:
 F_H – is the nominal value of the traction; v_H – is the nominal speed

Согласно (14), первый участок соответствует постоянству максимального тягового усилия F_{\max} , второй – постоянству P_H , третий – постоянству v_{\max} . Реализация тяговой характеристики $F = f(v)$ обеспечивается соответствующим регулированием угловой скорости ω и момента M ТЭД в САР.

Типичная статическая механическая характеристика $M = f(\omega)$ ТЭД в САР, соответствующая характеристике транспортного средства, представлена на рис. 5. На участке регулирования угловой скорости ТЭД от $\omega = 0$ до минимальной ω_{\min} САР должна поддерживать тяговый момент M на максимальном уровне M_{\max} , что необходимо для обеспечения заданного ускорения при разгоне.

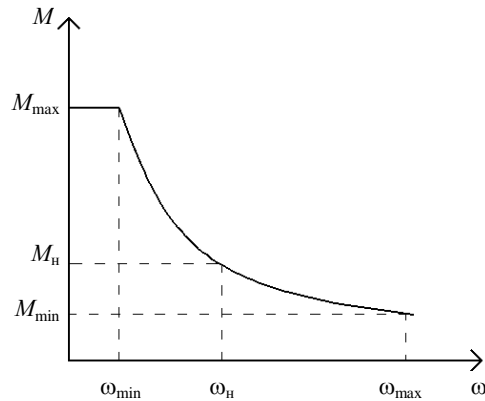


Рис. 5. Типичная статическая механическая характеристика тягового электродвигателя
 в системе автоматического регулирования

Fig. 5. A typical static mechanical characteristic of a traction motor
 in the system of automatic control

Регулирование угловой скорости в диапазоне от ω_{\min} до ω_{\max} осуществляется САР в функции тягового момента M для обеспечения постоянной мощности ТЭД, что обусловлено ограниченной на номинальном уровне мощностью автономной энергоустановки транспортного средства. Причем

на одной части данного диапазона – от ω_{\min} до ω_n – работа ТЭД допустима лишь кратковременно, так как момент двигателя M превышает номинальный M_n , а на другой части – от ω_n до ω_{\max} – длительно, так как $M \leq M_n$. При достижении угловой скоростью максимального значения САР осуществляет стабилизацию угловой скорости на уровне ω_{\max} .

Конкретная статическая механическая характеристика $M = f(\omega)$ ТЭД в САР определяется на основе требуемого цикла движения и уравнения движения электромобиля (13). Для получения данной характеристики необходимо определить следующие параметры:

1) максимальный момент M_{\max} , ограничиваемый сцеплением колес с дорогой;

2) минимальный момент M_{\min} при ω_{\min} , необходимый для обеспечения движения электромобиля с максимальной скоростью v_{\max} ;

3) номинальные величины P_n , M_n и ω_n .

Максимальный момент. Максимальный тяговый момент ТЭД [8] находим по формуле

$$M_{\max} = \frac{\frac{L_2}{L} \mu N}{1 + \frac{\mu h_g}{L}} \frac{r}{\eta_n i}, \quad (15)$$

где L_2 – расстояние задних колес до центра масс; L – расстояние между осями колес; μ – коэффициент сцепления колес и дорожного покрытия; h_g – высота центра масс.

Минимальный момент. Момент M_{\min} определяется из решения уравнения (13) для равномерного движения при максимальной скорости электромобиля v_{\max} по горизонтальному участку дороги. Подставив $M = M_{\min}$, $d\omega/dt = 0$, $\omega = \omega_{\max}$, $\alpha = 0$ в (13), получим:

$$\eta_n M_{\min} - \frac{1}{2} \rho C_d A_f \left(\frac{r}{i} \right)^3 \omega_{\max}^2 - G \delta \frac{1}{i} = 0. \quad (16)$$

Из (16) определим

$$M_{\min} = \frac{1}{\eta_n} \left(\frac{1}{2} \rho C_d A_f \left(\frac{r}{i} \right)^3 \omega_{\max}^2 + \frac{G \delta}{i} \right). \quad (17)$$

Минимальная мощность P_{\min} , необходимая для поддержания постоянной скорости движения электромобиля v_{\max} , вычисляется по формуле

$$P_{\min} = M_{\min} \omega_{\max} = \frac{\omega_{\max}}{\eta_n} \left(\frac{1}{2} \rho C_d A_f \left(\frac{r}{i} \right)^3 \omega_{\max}^2 + \frac{G \delta}{i} \right). \quad (18)$$

Номинальные величины. Номинальные величины P_n , M_n и ω_n должны выбираться таким образом, чтобы обеспечить разгон электромобиля с требуемым ускорением на всех интервалах заданного цикла движения. С другой стороны, значения P_n и M_n должны быть минимальными для обеспечения минимально возможной массы и габаритов электродвигателя, а номи-

нальная скорость ω_n такой, чтобы проектируемый двигатель обеспечил возможность регулирования скорости в диапазоне от ω_n до ω_{\max} при постоянной мощности.

Определим время разгона ТЭД от угловой скорости ω_1 до ω_2 для разгона электромобиля от скорости v_1 до v_2 . Из уравнения (13)

$$dt = \frac{J_{\Sigma} d\omega}{M\eta_{\pi} - \frac{N\delta}{i} - \frac{1}{2}\rho C_d A_f \left(\frac{r}{i}\right)^3 \omega^2 - G \sin \alpha \frac{r}{i}}. \quad (19)$$

Проинтегрировав (19), определим время разгона

$$t_{\text{pr}} = J_{\Sigma} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M\eta_{\pi} - \frac{N\delta}{i} - \frac{1}{2}\rho C_d A_f \left(\frac{r}{i}\right)^3 \omega^2 - G \sin \alpha \frac{r}{i}}. \quad (20)$$

Разгон электромобиля по горизонтальному участку дороги ($\alpha = 0$) от скорости $v = 0$ ($\omega_1 = 0$) до стандартной скорости $v_{\text{ст}}$ ($\omega_2 = \omega_{\text{ст}}$) при условии $v_{\text{ст}} \leq v_n$ ($\omega_{\text{ст}} \leq \omega_n$) осуществляется при постоянстве момента $M_n = P_n / \omega_n$ (рис. 5). С учетом этого выражение (20) запишется в виде

$$t_{\text{pr}} = \int_0^{\omega_{\text{ст}}} \frac{J_{\Sigma} d\omega}{\frac{P_n}{\omega_n} \eta_{\pi} - \frac{N\delta}{i} - \frac{1}{2}\rho C_d A_f \left(\frac{r}{i}\right)^3 \omega^2}. \quad (21)$$

При условии $v_{\text{ст}} > v_n$ ($\omega_{\text{ст}} > \omega_n$) процесс разгона электромобиля от $v = 0$ до v_n (от $\omega = 0$ до ω_n) осуществляется с постоянством момента $M_n = P_n / \omega_n$, а от v_n до $v_{\text{ст}}$ (от ω_n до $\omega_{\text{ст}}$) – в режиме постоянной мощности с моментом $M(\omega) = P_n / \omega$ (рис. 5). С учетом этого время разгона

$$t_{\text{pr}} = \int_0^{\omega_n} \frac{J_{\Sigma} d\omega}{\frac{P_n}{\omega_n} \eta_{\pi} - \frac{N\delta}{i} - \frac{1}{2}\rho C_d A_f \left(\frac{r}{i}\right)^3 \omega^2} + \int_{\omega_n}^{\omega_{\text{ст}}} \frac{J_{\Sigma} d\omega}{\frac{P_n}{\omega} \eta_{\pi} - \frac{N\delta}{i} - \frac{1}{2}\rho C_d A_f \left(\frac{r}{i}\right)^3 \omega^2}. \quad (22)$$

Из (21) и (22) следует, что время разгона ТЭД от 0 до $\omega_{\text{ст}}$ является функцией трех переменных ω_n , $\omega_{\text{ст}}$ и P_n (рис. 6), то есть

$$t_{\text{pr}} = t_{\text{pr}}(\omega_n, \omega_{\text{ст}}, P_n). \quad (23)$$

Тяговый электродвигатель с номинальной мощностью P_n и номинальной скоростью ω_n при движении электромобиля в стандартном цикле должен обеспечить требуемое ускорение на всех интервалах

$$t_k = t_{\text{пр}}(\omega_n, \omega_k, P_n) \leq t_k^*, \quad (24)$$

где t_k – время разгона от 0 до скорости ω_k при номинальной скорости ω_n и номинальной мощности P_n ; ω_k – конечная скорость на интервале разгона k ; t_k^* – требуемое время разгона до скорости ω_k на интервале k ; $k = 1, \dots, n_{\text{пр}}$; $n_{\text{пр}}$ – количество интервалов разгона.

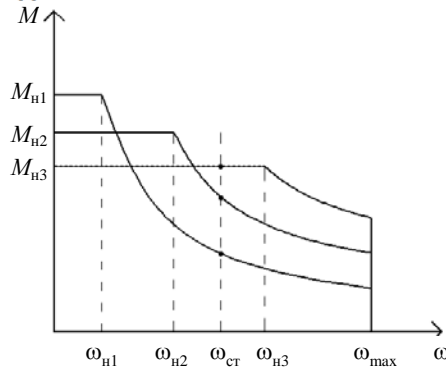


Рис. 6. Механические характеристики тягового электропривода с разными значениями номинальной мощности электродвигателя

Fig. 6. Mechanical characteristics of an electric traction drive with different values of rated power of the motor

На область определения функции (24) накладывается ряд технических ограничений:

- максимальное значение тягового момента M_{max} из условия надежного сцепления колес с дорогой

$$M_n \leq M_{\text{max}};$$

- минимальное значение мощности, необходимое для движения электромобиля при максимальной скорости ω_{max} :

$$P_n \geq P_{\text{min}};$$

- максимальное значение скорости

$$\omega_n \leq \omega_{\text{max}};$$

- максимальный допустимый диапазон регулирования электродвигателя D_{max} , т. е. $D = \omega_{\text{max}}/\omega_n \leq D_{\text{max}}$. Минимальное значение номинальной скорости определяется выражением

$$\omega_n^{\text{min}} = \frac{\omega_{\text{max}}}{D_{\text{max}}}.$$

При заданной стандартной скорости ω_k существует минимальная номинальная мощность P_n^{min} , удовлетворяющая условию (24) и обеспечивающая разгон электромобиля на каждом k -м интервале цикла до скорости ω_k за время $t_k \leq t_k^*$:

$$P_{\text{н}}^{\min} = \max \{P_k\}, \quad (25)$$

где P_k – решение уравнения

$$t_{\text{пр}}(\omega_{\text{н}}, \omega_k, P_k) = t_k^*. \quad (26)$$

Мощность P_k представляет собой минимальную мощность, необходимую для обеспечения разгона электромобиля на интервале k за время $t_{\text{пр}} = t_k^*$.

Минимальный номинальный момент $M_{\text{н}}^{\min}$, необходимый для обеспечения разгона на всех интервалах цикла движения электромобиля:

$$M_{\text{н}}^{\min} = \frac{P_{\text{н}}^{\min}}{\omega_{\text{н}}}. \quad (27)$$

Изменяя значение скорости $\omega_{\text{н}}$ от 0 до ω_{max} , по выражениям (25), (26) можно построить график функции $P_{\text{н}}^{\min} = f(\omega_{\text{н}})$, а по (27) – график функции $M_{\text{н}}^{\min} = f(\omega_{\text{н}})$. Типичные кривые функции $P_{\text{н}}^{\min} = f(\omega_{\text{н}})$ и $M_{\text{н}}^{\min} = f(\omega_{\text{н}})$ представлены на рис. 7.

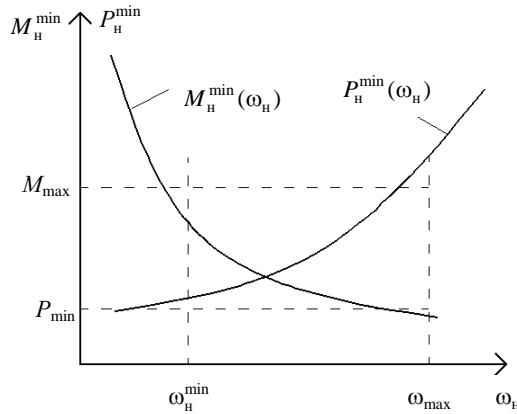


Рис. 7. Кривые минимальной мощности $P_{\text{н}}^{\min}(\omega_{\text{н}})$ и соответствующего момента $M_{\text{н}}^{\min}(\omega_{\text{н}})$

Fig. 7. The curves of the minimum power $P_{\text{н}}^{\min}(\omega_{\text{н}})$ and of the corresponding moment $M_{\text{н}}^{\min}(\omega_{\text{н}})$

Технические ограничения M_{max} , P_{min} , ω_{max} , $\omega_{\text{н}}^{\min}$ нанесены на рис. 7 штриховыми линиями. Из полученных графиков можно определить номинальные значения $P_{\text{н}}$, $\omega_{\text{н}}$ тягового электродвигателя следующим образом:

- задаем номинальный момент $M_{\text{н}} = M_{\text{max}}$; определяем значение $\omega_{\text{н}}$ из пересечения линии $M_{\text{н}} = M_{\text{max}}$ и кривой $M_{\text{н}}^{\min}(\omega_{\text{н}})$; находим значение $P_{\text{н}} = P_{\text{н}}^{\min}(\omega_{\text{н}})$;

- если полученная номинальная мощность меньше P_{min} , то задаем номинальную мощность $P_{\text{н}} = P_{\text{min}}$; определяем значение $\omega_{\text{н}}$ из пересечения линии $P_{\text{н}} = P_{\text{min}}$ и кривой $P_{\text{н}}^{\min}(\omega_{\text{н}})$; находим значение $M_{\text{н}} = M_{\text{н}}^{\min}(\omega_{\text{н}})$;

• если полученный диапазон регулирования не осуществляется, то заданем $D = \omega_{\max}/\omega_n = D_{\max}$; определяем $\omega_n = \omega_{\max}/D_{\max}$, $P_n = P_n^{\min}(\omega_n)$, $M_n = M_n^{\min}(\omega_n)$.

На основе полученного метода проведен расчет механической характеристики ТЭД для городского цикла движения электромобиля по Правилам № 83-05 ЕЭК ООН [10]. Полученная характеристика представлена на рис. 8, исходные данные – в табл. 1.

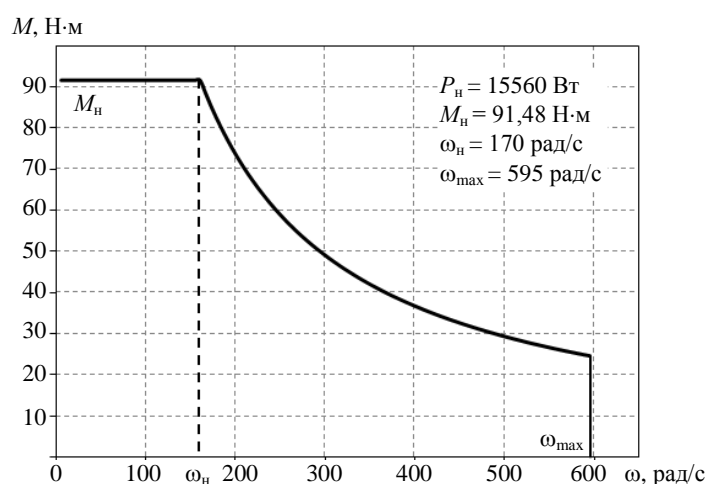


Рис. 8. Требуемая статическая механическая характеристика тягового электродвигателя

Fig. 8. The desired static mechanical characteristic of a traction motor

Таблица 1

Исходные данные электромобиля
The original data of an electric vehicle

Описание	Обозначение, единица измерения	Величина
Масса рамы с кузовом	m_1 , кг	900
Масса колеса	m_2 , кг	10
Общая масса тягового двигателя и редуктора	m , кг	50
Максимальная скорость электромобиля	v_{\max} , км/ч	60

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа вариантов схем тягового электропривода выбрана схема для дальнейшего проектирования.

2. Получено уравнение движения электромобиля, соответствующее расчетной схеме.

3. Получены выражения для расчета характерных точек статической механической характеристики тягового электродвигателя.

4. Разработана методика определения номинальных значений мощности и угловой скорости тягового электродвигателя.

5. Осуществлен расчет требуемой статической механической характеристики тягового электродвигателя для городского грузового электромобиля малой грузоподъемности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические трансмиссии пневмоколесных транспортных средств / И. С. Ефремов [и др.]. М.: Энергия, 1976. 256 с.
2. Электрические машины в тяговом автономном электроприводе / Ю. М. Андреев [и др.]; под ред. А. П. Пролыгина. М.: Энергия, 1979. 240 с.
3. Zeraouila, M. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: a Comparative Study / M. Zeraouila, M. E. H. Benbouzid, D. Diallo // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2006. Vol. 55, No 6. P. 1756–1764.
4. Богданов, К. Л. Тяговый электропривод автомобиля / К. Л. Богданов. М.: МАДИ, 2009. 57 с.
5. Ключев, В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
6. Фираго, Б. И. Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. 2-е изд. Минск: Техноперспектива, 2007. 585 с.
7. Гурский, Н. Н. Виртуальное проектирование ходовой части мобильных машин / Н. Н. Гурский, Ан. М. Захарик, Ал. М. Захарик. Минск: БНТУ, 2010. 174 с.
8. Златин, П. А. Электромобили и гибридные автомобили / П. А. Златин, В. А. Кеменов, И. П. Ксенович. М.: Агроконсалт, 2004. 416 с.
9. Теория и расчет тягового привода электроавтомобилей / под ред. И. С. Ефремова. М.: Высш. шк., 1984. 383 с.
10. Правила ЕЭК ООН № 83 (06) / Пересмотр 4. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении выбросов загрязняющих веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей. Взамен Правил ЕЭК ООН № 83 (05) / Пересмотр 3; введ. 01.01.2013. Минск: Госстандарт, Минск: БелГИСС, 2012. 311 с.

Поступила 08.11.2016 Подписана в печать 05.01.2017 Опубликовано онлайн 31.01.2017

REFERENCES

1. Efremov I. S., Prolygin A. P., Andreev Iu. M., Mindlin A. B. (1976) *Electric Transmissions of Rubber-Tired Vehicles*. Moscow, Energiya. 256 (in Russian).
2. Andreev Iu. M., Isaakian K. G., Mashikhin A. D., Mindlin A. B., Prolygin A. B., Tikhomirov B. D (1979) *Electric Machines in Autonomous Electric Traction*. Moscow. Energiya. 240 (in Russian).
3. Zeraouila M., Benbouzid M. E. H., Diallo D. (2006) Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: a Comparative Study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 55 (6), 1756–1764. DOI: 10.1109/TVT.2006.878719.
4. Bogdanov K. L. (2009) *Electric Traction of a Vehicle*. Moscow, MADI [Moscow State Automobile and Road Technical University]. 57 (in Russian).
5. Klyuchev V. I. (1985) *Theory of Electric Drive*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 560 (in Russian).
6. Firago B. I., Pavlyachik L. B. (2007) *Theory of Electric Drive*. 2nd ed. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ. 585 (in Russian).
7. Gursky N. N., Zakharik An. M., Zakharik Al. M. (2010) *Virtual Design of a Running Gear of Mobile Machines*. Minsk: BNTU. 174 (in Russian).
8. Zlatin P. A., Kemenov V. A., Ksenevich I. P. (2004) *Electric and Hybrid Cars*. Moscow, Agrokonsalt Publ. 416 (in Russian).
9. Efremov I. S., Prolygin A. P., Andreev Iu. M., Mindlin A. B. (1984) *Theory and Calculation of Traction Drive of Electric Cars*. Moscow, Vysshaya Shkola. 383 (in Russian).
10. UNECE Regulation 83 (06)/Revision 4. Uniform Provisions Concerning the Official Approval of Vehicles with Regard to the Emission of Pollutants Depending on the Fuel Required for the Engines. Instead of UNECE Regulation 83 (05)/Revision 3. Minsk, State Committee for Standardization, 2012. 311 (in Russian).

Received: 8 November 2016 Accepted: 5 January 2017 Published online: 31 January 2017