

УДК 621.314.261

DOI: 10.24160/1993-6982-2022-2-77-85

Исследование и расчет электромеханических характеристик электросамоката

Е.М. Соколова, А.Д. Белов

Приведена конструкция электросамоката. Показана целесообразность использования двигателя обращенного типа с внешним ротором, являющимся частью колеса. На внутренней поверхности ротора, обращенной к воздушному зазору, расположены постоянные магниты с большим числом пар полюсов. Данная конструкция позволяет развивать низкие скорости и избавляет от механических редукторов.

Рассмотрим выбор главных размеров ротора на основе удельной касательной силы. Статор состоит из корпуса сердечника с обмоткой, обычно трехфазной. В двигателях самоката целесообразна сосредоточенная обмотка с дробным q , наматываемая вокруг зубца и образующая на нем отдельную катушку, принадлежащую к одной из фаз. В подобной обмотке не пересекаются концевые витки, её лобовые части намного короче, чем у распределенных обмоток. Обмотка статора питается от инвертора, управляемого синхронно с вращением ротора (ДПР). Рассматриваемый электромеханический преобразователь ничем не отличается от обычной синхронной машины. Режим работы с постоянством момента нехарактерен для двигателя самоката. При изменении режима работы, например, при переходе на другой участок пути, все процессы развиваются аналогично тем, которые имеют место в обычных двигателях постоянного тока. Для подтверждения этого дан расчет двигателя, определены его параметры. Создан алгоритм расчета механических и рабочих характеристик самоката.

Ключевые слова: электросамокат, постоянные магниты, механическая характеристика, рабочие характеристики.

Для цитирования: Соколова Е.М., Белов А.Д. Исследование и расчет электромеханических характеристик электросамоката // Вестник МЭИ. 2022. № 2. С. 77—85. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-2-77-85.

Investigation and Calculation of Electric Scooter Electromechanical Characteristics

E.M. Sokolova, A.D. Belov

The design of an electric scooter is presented. The advisability of using an inverted motor with an external rotor, which is part of the wheel, is shown. Permanent magnets producing a large number of pole pairs are installed on the rotor inner surface facing the air gap. With such design, low scooter motion speeds can be obtained without the need of using mechanical gearboxes. The choice of the rotor main dimensions based on the specific tangential force is considered. The stator consists of a core body with a winding, usually a three-phase one. In scooter motors, it is advisable to use a concentrated winding with a fractional q , which is wound around the tooth to form a separate coil on it, belonging to one of the phases. In such winding, the end turns do not intersect; its end-winding parts are much shorter than they are in distributed windings. The stator winding is powered by an inverter controlled synchronously with the rotor rotation. The considered electromechanical converter is nothing but a conventional synchronous machine. Constant torque operation is not typical for the scooter motor. When the user changes the scooter operation mode, for example, in changing over to another track section, all processes develop similarly to those that take place in conventional DC motors. To confirm this, the calculation of the motor is given, and its parameters are determined. An algorithm for calculating the scooter mechanical and performance characteristics has been developed. The results can be used to implement nonlinear vector control systems for a seven-phase motor.

Key words: electric scooter, permanent magnets, mechanical characteristic, performance characteristics.

For citation: Sokolova E.M., Belov A.D. Investigation and Calculation of Electric Scooter Electromechanical Characteristics. Bulletin of MPEI. 2022;2:77—85. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2022-2-77-85.

Введение

Развитие надежных и экономичных управляемых полупроводниковых преобразователей привело к повсеместному внедрению их в промышленности и на электромашино-вентильных системах транспорта, где электрические машины органически совмещены с электронными компонентами. Применение высокоэнергетических постоянных магнитов на базе редкоземельных металлов изменило традиционную электрическую машину [1]. Применение данных магнитов в вентильных машинах постоянного тока обеспечило ощутимый скачок в технических и массогабаритных показателях по сравнению с традиционными коллекторными машинами. Машины с остаточной индукцией $Br = 0,9...1,2$, Тл и коэрцитивной силой $H_c = (6...10) \cdot 10^5$ А/м позволяют резко понизить массу системы возбуждения. Появились разнообразные конструкции систем с постоянными магнитами, позволяющие создавать новые электрохимические преобразователи для различных механизмов. Примером подобного механизма является электросамокат [2 — 4].

Для электросамоката целесообразен двигатель с внешним ротором, т. е. двигатель обращенного типа. На рисунке 1 показано конструктивное исполнение статора и ротора электрохимического преобразователя самоката. Существуют различные способы размещения постоянных магнитов на роторе [5 — 7]. Наиболее подходящей для самоката считается схема с расположением магнитов на внутренней поверхности, обращенной к воздушному зазору. Такая конструкция ротора позволяет избавиться от механических передач: цепных и планетарных редукторов. Большое число полюсов магнитов дает низкие скорости вращения ротора и, соответственно, колеса самоката.

Статор состоит из корпуса и сердечника с обмоткой, обычно трехфазной. В двигателях самоката используют сосредоточенную обмотку с дробным q , наматываемую вокруг зубца и образующую на нем отдельную катушку, принадлежащую к одной из фаз [8, 9]. В такой обмотке концевые витки не пересекаются, её лобовые части намного короче, чем у распределенных обмоток. Как правило, количество витков небольшое, поэтому они легко устанавливаются вокруг зубца, что упрощает производство и ремонт двигателей. Катушки, входящие в катушечную группу, не имеют межкатушечных соединений, поскольку наматываются непрерывно (витки первой катушки наматывают по часовой, второй — против часовой стрелки и т. д.).

Трехфазная обмотка статора запитана от инвертора, управляемого синхронно с вращением ротора. Сигнал на включение той или иной фазы поступает от датчика положения ротора (ДПР) [10, 11]. Таким образом, рассматриваемый электрохимический преобразователь ничем не отличается от обычной синхронной машины. При управлении инвертором с независимым заданием частоты на его выходе двигатель обладал бы всеми

свойствами обычного синхронного двигателя с частотным регулированием скорости.

Очевидно, что режим работы с постоянством момента не характерен для двигателя самоката. При его изменении, например, при переходе на другой участок пути, все процессы развиваются аналогично тем, которые имеют место в обычных двигателях постоянного тока. При увеличении момента сопротивления на валу начинается переходный процесс, частота вращения ротора уменьшается в течение всего времени, пока тормозной момент нагрузки превышает момент, развиваемый двигателем. Происходит одновременное уменьшение частоты управляющих импульсов от датчика положения ротора, закрепленного на роторе двигателя, и, соответственно, частоты переключения вентилей инвертора и его выходной частоты. Для подтверждения следует рассмотреть двигатель и построить его механическую характеристику. Некоторые исходные данные опубликованы в каталогах уже работающих самокатов.

Рассмотрим типичный самокат средней мощности. Номинальные мощность и частота вращения — $P_{2н} = 350$ Вт, $n_{ном} = 800$ об./мин; число фаз обмотки якоря — $m_1 = 3$; число пар полюсов — $p = 15$; количество пазов на полюс и фазу — $q = 0,3$. Используемая марка магнитов — N33H-неодим-железо-бор (NdFeB): $H_c = 1350$, кА/м; $Br = 1,25$, Т.

При известных числах пар полюсов и номинальной частоте вращения частота тока в обмотках равна

$$f = pn/60 = 15 \cdot 800/60 = 200 \text{ Гц.}$$

Определим главные размеры двигателя, используя величину удельной касательной силы F_k , согласно [12]. Касательная сила равна силе, снимаемой с площадки ротора в 1 см^2 . Для вентильных двигателей мощностью от 100 до 1000 Вт она располагается в диапазоне $F_k = 0,7...1,5 \text{ Н/см}^2$.

Момент двигателя с учетом F_k запишем как

$$M = F_k \pi D_i^2 L_1 / 2, \quad (1)$$

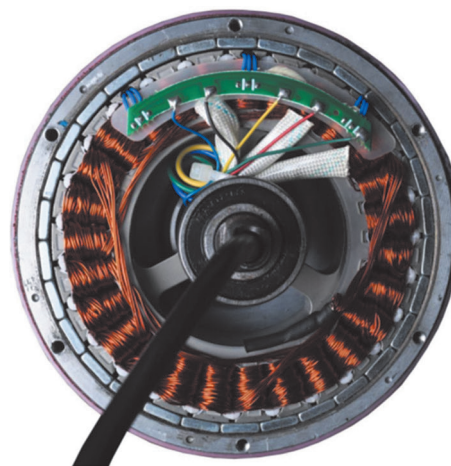


Рис. 1. Конструктивное исполнение статора и ротора двигателя самоката

где D_i — внешний диаметр статора; L_1 — длина статора.

При $\lambda = L_1/D_i$, где λ — конструктивный коэффициент отношения длины к внутреннему диаметру сердечника статора, зависящий от количества пар полюсов, формула (1) приобретает следующий вид:

$$M = F_k \pi D_i^3 \lambda / 2,$$

тогда внешний диаметр

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{2 M}{\pi F_k \lambda}}. \quad (2)$$

Полагая, что удельное усилие $F_k = 0,7$ Н/см², $\lambda = 0,5$ и номинальный момент

$$M_n = P_{2н} / \omega_n = 350 / 83,7 = 4,17 \text{ Н}\cdot\text{м} = 417 \text{ Н}\cdot\text{см},$$

где $\omega_n = 2\pi f_1/p = 2\pi \cdot 200/15 = 83,7$ рад/с, определим внешний диаметр статора, согласно (2):

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 417}{\pi \cdot 0,7 \cdot 0,3}} = 10,8 \text{ см} = 108 \text{ мм}.$$

Используя это значение для диаметра D_i , вычислим длину магнитопровода статора:

$$L_1 = \lambda D_i = 108 \cdot 0,5 = 54 \text{ мм}.$$

С другой стороны, наружный диаметр ротора является ободом колеса, на которое надета крышка. Радиус колеса должен обеспечить линейную скорость $V = 20 \dots 24$ км/час. Для двигателей самоката отношение внутреннего диаметра ротора к наружному диаметру таково: $D_i/D_n = 0,8$.

Выбрав наружный диаметр ротора $D_n = 160$ мм, получим линейную скорость колеса V , равную

$$V = \omega_n (D_n/2) \cdot 3600/1000 = 83,7 \cdot 160 \cdot 10^{-3} \cdot 3,6 = 24,1 \text{ км/ч},$$

тогда внешний диаметр —

$$D_i = D_n \cdot 0,8 = 160 \cdot 0,8 = 128 \text{ мм}.$$

Примем внешний диаметр статора $D_i = 130$ мм. По данному значению установим длину статора:

$$L_1 = \lambda D_i = 108 \cdot 0,5 = 54 \text{ мм}.$$

Поскольку внешний диаметр увеличился, а объем активной части $D_i^2 L_1 = \text{const}$, то длина статора L_1 должна быть уменьшена. Примем длину статора $L_1 = 40$ мм.

Внутренний диаметр статора:

$$D_{2н} = D_i \kappa_1,$$

где $\kappa_1 = 0,6$.

Исходя из заданного напряжения, вычислим требуемое число витков обмотки статора [14]:

$$W_1 = \frac{E_\delta}{\pi \sqrt{2} f_1 \Phi_\delta k_{o1}};$$

$$\Phi_\delta = 2/\pi \tau L_1 B_\delta,$$

где W_1 — число витков фазы; $E_\delta = k_e U_\phi$ — ЭДС воздушного зазора; $k_e = 0,97$ — уточняемый коэффициент снижения напряжения; $\kappa_{o1} = 0,861$ — обмоточный коэффициент по первой гармонике; τ — полюсное деление.

Напряжение на аккумуляторе $U_{ак} = 36$ В переходит в фазное напряжение посредством преобразователя: $U_\phi = k_n U_{ак} / \sqrt{3}$, В, где $k_n = 0,95$ — коэффициент, учитывающий потерю напряжения в преобразователе.

Обмоточный коэффициент на основе анализа ЭДС девяти катушек, образующих фазу, равен [8, 9]:

$$\kappa_{o1} = (1 + 4\cos(\pi/9) + 4\cos(2\pi/9)) / (Z/m) = 0,861,$$

где $Z = 27$ — число зубцов статора; $m = 3$ — число фаз.

При индукции в воздушном зазоре ($B_\delta = 0,8$ Т) установим размеры зубцов b_z и ярма h_a для принятых в практике проектирования электрических машин значений индукций $B_z = 1,6 \dots 1,7$ Т и $B_a = 1,4 \dots 1,6$ Т [13, 14]. Это позволяет найти поперечные размеры, высоту и площадь паза: b_{p1}, b_{p2}, h_p, S_p .

По известному числу витков в фазе определим число проводников в пазу. Задав коэффициент заполнения $\kappa_s = 0,4 \dots 0,6$, вычислим диаметр провода обмотки статора d_{Cu}/d_{iz} , его сечение S_{Cu} , а также число элементарных проводников $n = 5 \dots 7$.

Исходя из заданной мощности $P_{2н}$ и номинальной скорости вращения ротора ω_n , рассчитаем момент M_n , действующий на ротор, а затем рабочую поверхность и удельную силу F_k , которую используем для уточнения размеров при оптимизации двигателя.

В результате приведенных расчетов сформирована конструкция двигателя (таблица).

Для расчета характеристик двигателя необходимо определить ЭДС E_0 , наведенную полем постоянных магнитов в фазе статора, и синхронные сопротивления реакции якоря X_{ad} и X_{aq} , а также активное сопротивление статора R_s . Для этого следует найти размеры постоянных магнитов.

Ширина магнитов выбрана равной величине $b_m = \alpha_i \tau$, где $\alpha_i = 0,8$ — коэффициент полюсного перекрытия [14]. Высота магнита h_m должна быть такой, чтобы получить высокое значение индукции в воздуш-

Основные размеры электродвигателя самоката

Электродвигатель	Внешний диаметр статора D_p , мм	Длина магнитопровода L_1 , мм	Воздушный зазор δ , мм	Наружный диаметр ротора D_{ra} , мм	Высота магнита h_m , мм	Ширина магнита b_m , мм
Расчетный	130	0,45	0,05	180	2,5	11,3
Изготовленный в КНР	135	0,40	0,05	175	2,0	12,0

ном зазоре $B_\delta = 0,9$ Т. Зазор $\delta = 0,5$ мм, далее этот размер также можно уточнить.

Высота магнитов составляет [14]:

$$h_m = 4(\delta k_\delta k_\mu)(B_\delta/B_r)\mu_r^* = \\ = 4(0,5 \cdot 1/0,6 \cdot 1,05)(0,8/1,25)0,78 = 3,1 \text{ мм.}$$

Примем $h_m = 2,8$ мм, в дальнейшем эта величина также может корректироваться.

ЭДС холостого хода E_0 равна

$$E_0 = \pi\sqrt{2}f(W_1 k_{o1})\Phi_{f1},$$

где $\Phi_{f1} = \frac{2}{\pi}\tau L_1 B_{\delta m1} k_\sigma$ — поток магнитов; $k_\sigma = 0,93$ — коэффициент рассеяния потока магнита.

Индукция в воздушном зазоре от поля магнитов:

$$B_{\delta m1} = \frac{Br}{1 + (\mu_r^* \delta')/hm},$$

где h_m — высота магнита; $\delta' = \delta k_\delta k_\mu$ — расчетная величина воздушного зазора с учетом насыщения k_μ и зубчатости статора k_δ ; $\mu_r^* = 0,78$ — относительная магнитная проницаемость магнита,

$$\mu_r^* = B_r/(\mu_0 H_c)$$

Первая гармоника индукции в воздушном зазоре:

$$B_{\delta m1} = \frac{4}{\pi} B_{\delta m} \sin\left(\frac{\alpha_i \pi}{2}\right).$$

Коэффициент полюсного перекрытия $\alpha_i = 0,8$, тогда ширина магнита

$$b_m = \alpha_i \tau = 13 \cdot 0,8 = 10,8 \text{ мм,}$$

где величина полюсного деления $\tau = \pi D_i/2p = 3,14 \cdot 130/30 = 13$ мм.

Активное сопротивление статора R_s , индуктивные сопротивления рассеяния $X_{\sigma s}$ и реакции якоря X_{ad} и X_{aq} рассчитывают на основе формул, изложенных в [13, 14].

Индуктивные сопротивления реакции якоря по осям d, q :

$$X_{ad} = 4m_1 \mu_0 f_1 \frac{(W_1 k_{o1})^2}{\pi p} \frac{\tau L_1}{\delta'_d} kd;$$

$$X_{aq} = 4m_1 \mu_0 f_1 \frac{(W_1 k_{o1})^2}{\pi p} \frac{\tau L_1}{\delta'_q} kq,$$

где $m_1 = 3$ — число фаз; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость вакуума; W_1 — число витков фазы; k_{o1} — обмоточный коэффициент; τ — полюсное деление, м; f_1 — частота питания, Гц; L_1 — длина пакета статора, м; p — число пар полюсов; $\delta' = \delta k_\delta k_\mu + h_m/\mu_r^*$ — эквивалентный воздушный зазор; h_m — высота магнита, м; $\mu_r^* = Br/H_c/\mu_0$ — относительная магнитная проницаемость магнита; $k_\delta = 1,05$ — коэффициент Картера; δ — ме-

ханический воздушный зазор, м; $k_\mu = 1,06$ — коэффициент насыщения, взятый из расчета магнитной цепи двигателя.

Полные индуктивные сопротивления реакции якоря по осям d и q :

$$X_d = X_{ad} + X_{\sigma s}; \quad X_q = X_{aq} + X_{\sigma s}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора:

$$X_{\sigma s} = 4\pi \mu_0 f_1 \frac{(W_1 k_{o1})^2}{p} \frac{L_1}{q} \sum \lambda,$$

где $\sum \lambda$ — суммарный коэффициент магнитной проводимости для потоков рассеяния [13, 14].

В случае, когда магниты расположены на поверхности внешнего ротора (см. рис. 1) и не имеют полюсных башмаков, коэффициенты приведения реакции якоря по осям d и q равны единице, т. е. $k_{ad} = k_{aq} = 1$, тогда

$$X_{ad} = X_{aq} = X_a,$$

где

$$X_a = 4m_1 \mu_0 f_1 \frac{(W_1 k_{o1})^2 \tau L_1}{\pi p \delta'}.$$

В результате расчета получим данные параметров обмотки.

Данные расчета обмотки статора и ее параметров

Фазное напряжение U_ϕ , В.....	19
Номинальная мощность двигателя $P_{2н}$, Вт.....	350
Частота сети f_1 , Гц.....	200
Число фаз m	3
Число зубцов Z_1	27
Число полюсов $2p$	30
Число пазов на полюс и фазу q	0,3
Число витков фазы обмотки статора W_1	72
Число элементарных проводников на полюс и фазу, $n_{эл}$	7
Число эффективных проводников $n_{эф}$	8
Число проводников в пазу u_n	112
Диаметр неизолированного провода d , мм.....	0,7
Активное сопротивление фазы R_s , Ом.....	0,069
Индуктивное сопротивление $X_s = X_a + X_{\sigma s}$, Ом.....	0,337

Для расчета механических и рабочих характеристик двигателя используем следующий алгоритм:

1. Зададим ряд частот: $f_i = 250, 200, 150, \dots, 1$ Гц.
2. Определим относительную частоту вращения: $\omega^* = 2\pi f_i/p/f_{1ном}$
3. Пересчитаем параметры: $X_{di} = X_d^* \omega^*$; $X_{qi} = X_q^* \omega^*$, $E_{0i} = E_0^* \omega^*$.
4. При $\theta_{ном} = \text{const}$ вычислим токи по осям d и q :

$$I_{di} = \frac{U_\phi (X_{di} \cos(\theta_{ном}) - R_s \sin(\theta_{ном})) - E_{0i} X_{qi}}{X_{di} X_{qi} + R_s^2};$$

$$I_{qi} = \frac{U_\phi (X_{di} \sin(\theta_{ном}) + R_s \cos(\theta_{ном})) - E_{0i} R_s}{X_{di} X_{qi} + R_s^2}.$$

Ток статора I_{si} — функция фазного напряжения U_f , ЭДС E_0 , индуктивных сопротивлений X_{di} и X_{qi} , угла $\theta_{ном}$ и сопротивления R_s :

$$I_{si} = \sqrt{I_{di}^2 + I_{qi}^2}.$$

5. Найдем электромагнитные мощность $P_{эм}$ и момент $M_{эм}$:

$$P_{эм} = m_1 [I_{qi} E_{0i} + I_{di} I_{qi} (X_{di} - X_{qi})].$$

Электромагнитный момент синхронного неявнополюсного двигателя равен

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_{li}} = \frac{m_1 [I_{qi} E_{0i} + I_{di} I_{qi} (X_{di} - X_{qi})]}{\omega_{li}} = \frac{m_1 (I_{qi} E_{0i})}{\omega_{li}}.$$

6. Используя приведенные выражения, рассчитаем токи I_{di} , I_{qi} , I_{si} , потребляемую мощность P_{li} и электромагнитный момент $M_{эм}$. Затем, уточнив электрические $P_{сui}$ и магнитные P_{fei} , а также механические $P_{мехi}$ и добавочные $P_{добi}$ потери, аналогично вычислениям потерь в асинхронном двигателе, определим η_i и $\cos\varphi_i$.

7. Потребляемая мощность:

$$P_1 = m_1 U_f I_{si} \cos\varphi = m_1 U_f (I_{qi} \cos\theta_{ном} - I_{di} \sin\theta_{ном}).$$

8. Полезная мощность на валу:

$$P_{2i} = P_{1i} - P_{сui} - P_{fei} - P_{мехi} - P_{добi}$$

9. Коэффициент полезного действия:

$$\eta = P_{2i} / P_{1i}.$$

10. Коэффициент мощности:

$$\cos\varphi_i = P_{1i} / (m_1 U_f I_{si}).$$

11. Скорость холостого хода выразим из уравнения:

$$U_f \approx E_0 = 4,44 f_{xx} (W_1 k_o) \Phi_{dm},$$

где $\Phi_{dm} = 2/\pi L_1 B_{dm}$ — поток от магнитов; $B_{dm} = 0,8$ Т.

Определена частота $f_{xx} = 271$ Гц, тогда $\omega_{xx} = 2\pi f_{xx} / p = 113$ 1/с.

12. Пусковой момент M_n установим при частоте, близкой к нулю, т. е. $f_n = 0,1$ Гц, следовательно, $M_n = 155$ Н·м.

Построим механическую характеристику (рис. 2) — зависимость $\omega_i^* = f(M_{эм})$ для рассчитанных значений относительных частот.

Для ограничения пусковых токов и моментов следует включать добавочное сопротивление $R_{доб}$ в цепь постоянного тока последовательно с аккумулятором (аналогично двигателям постоянного тока с последовательным возбуждением). Механическая характеристика для этого случая приведена на рис. 3.

При отображении рабочих характеристик изменим частоту f_i так, чтобы момент M варьировался в пределах от 0 до $1,25M_{ном}$ (рис. 4 — 7).

Выводы

Показано, что для электросамоката целесообразно использование двигателя обращенной конструкции с внешним ротором, поскольку это позволит исключить дополнительные механические передачи. Обмотка с дробным $q \leq 1$ оптимальна для получения низких скоростей вращения ротора.

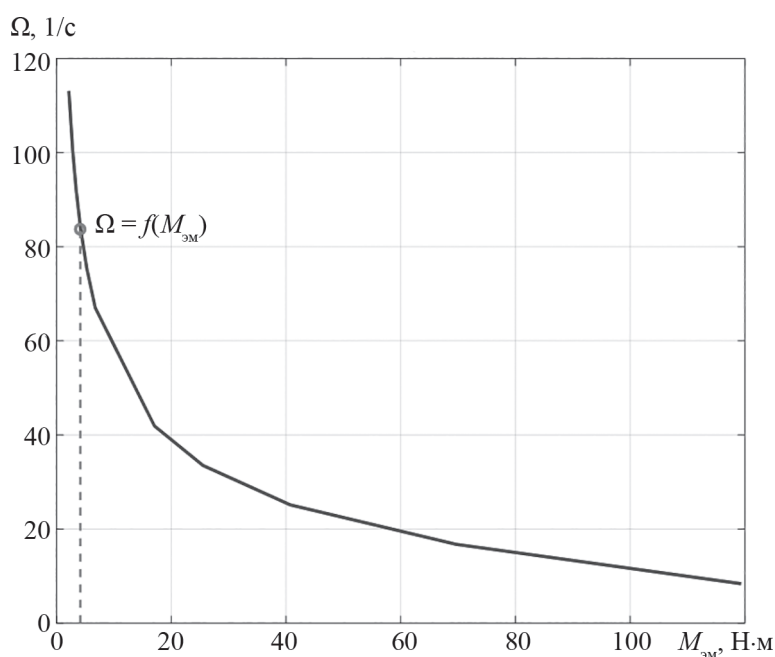


Рис. 2. Механическая характеристика двигателя при $R_{доб} = 0$

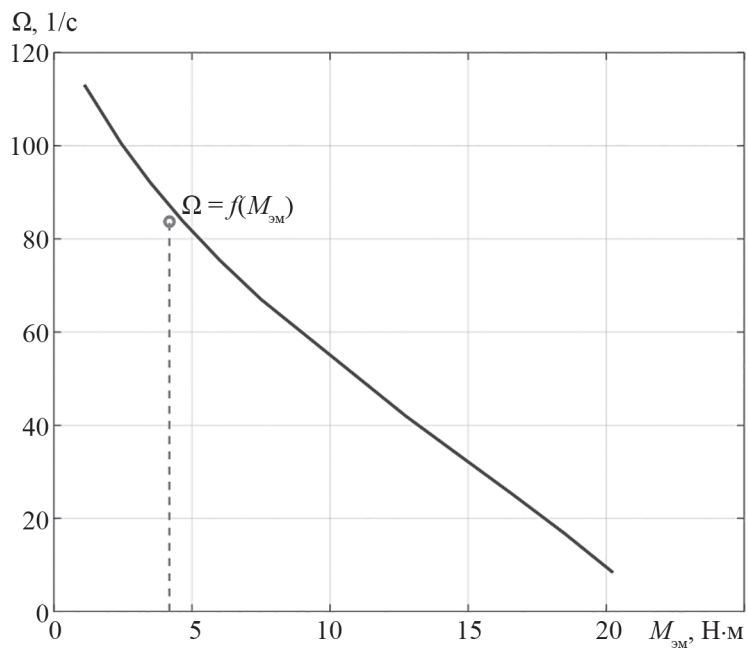
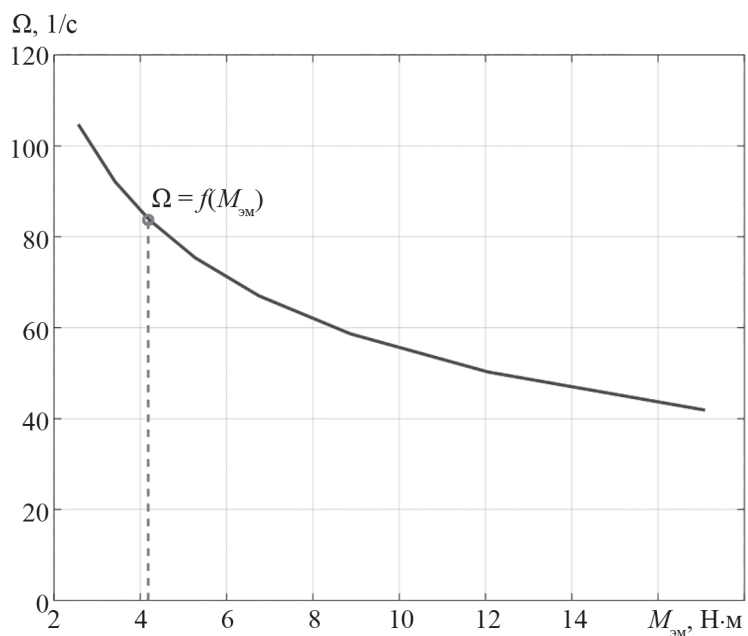
Рис. 3. Механическая характеристика двигателя при $R_{\text{доб}} \neq 0$ 

Рис. 4. График зависимости частоты вращения от момента

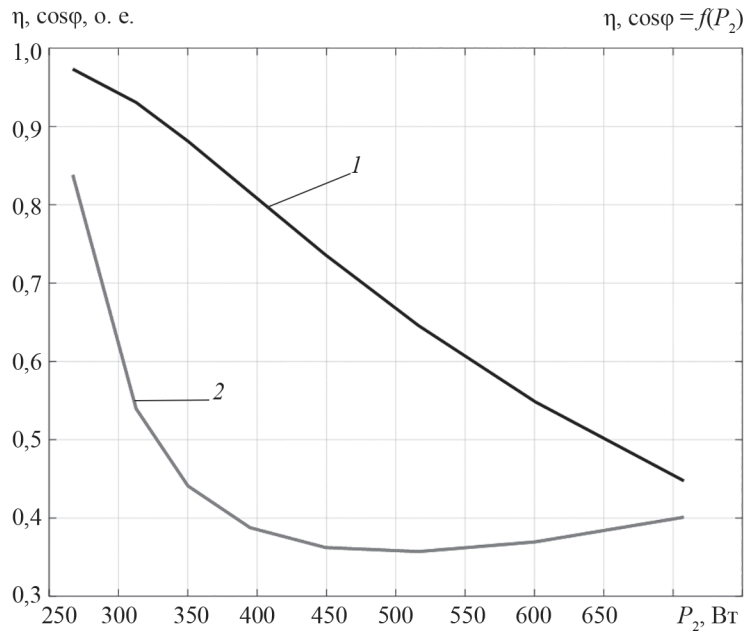


Рис. 5. Графики зависимости η (1) и $\cos\phi$ (2) от P_2

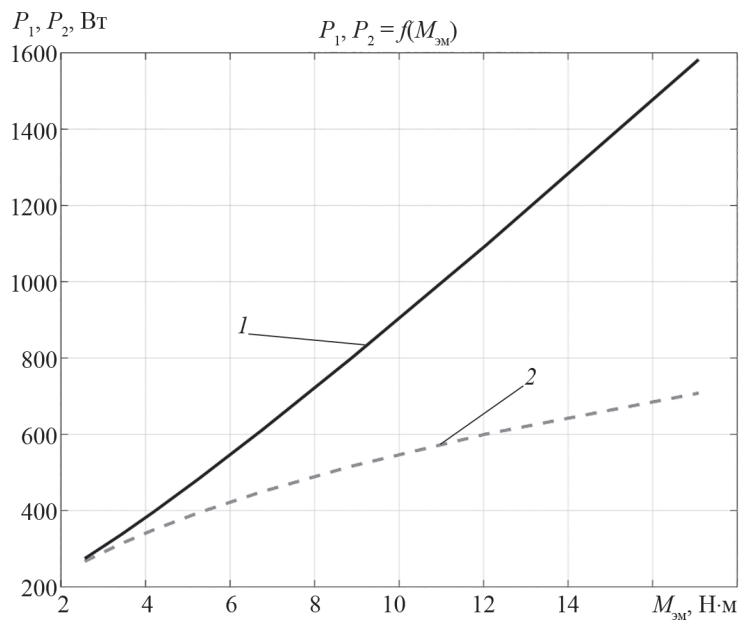


Рис. 6. Графики зависимости мощностей P_1 (1) и P_2 (2) от момента

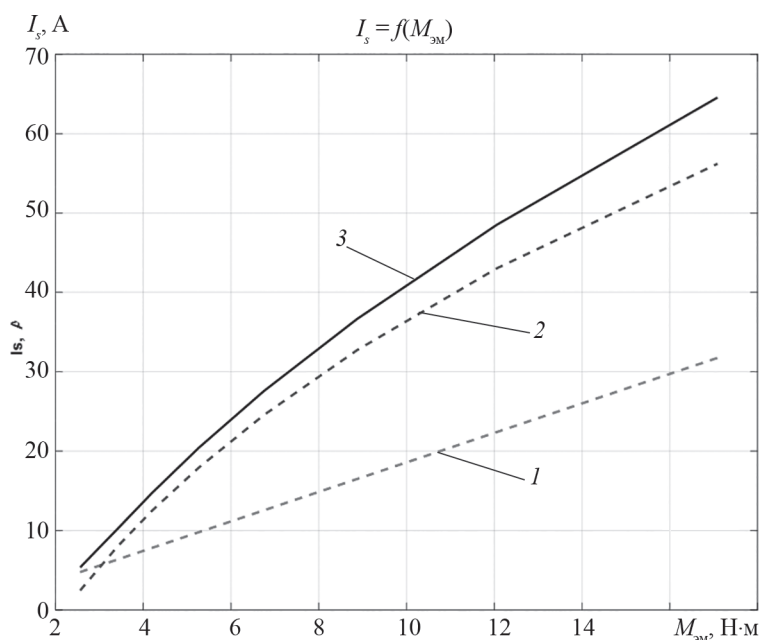


Рис. 7. Графики зависимости токов I_q (1), I_d (2) и I_s (3) от момента

Разработаны методика определения основных размеров двигателя и алгоритм расчета механических и рабочих характеристик. Отметим, что механическая

характеристика электросамоката подобна характеристике двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

Литература

1. McCallum R.W. e. a. Practical Aspects of Modern and Future Permanent Magnets // Annual Rev. Materials Research. 2014. V. 44. Pp. 451—477.

2. Смилянец Л.В., Литвиненко Т.П. Использование индивидуальных экологических транспортных средств в улично-дорожной структуре населенного пункта // Новые идеи нового века: Материалы Междунар. науч. конф. Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 2013. Т. 2. С. 428—433.

3. Агеев А.Н., Айтенов А.А., Чебоксаров А.Н. Классификация двухколесного электротранспорта в различных странах мира // Техника и технологии строительства. 2020. № 2(22). С. 4—8.

4. Грухлер Г. Кранц Й., Завишка Т. Системы электропривода для транспортных средств — концепции, примеры энергосбережения // Электротехнические и компьютерные системы. 2011. № 3(79). С. 123—127.

5. Ostroverkhov M. Trinchuk D. Study into Energy Efficiency of the Drive of Electric Vehicles with an Independent Power Supply Depending on the Configuration of the Power Source // Technology Audit and Production Reserves. 2018. V. 4. No. 1(42). Pp. 45—50.

6. Libert F. Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-speed Direct-driven mixer. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2004.

7. Lindegger M. Economic Viability, Applications and Limits of Efficient Permanent Magnet Motors. Switzerland: Swiss Federal Office of Energy, 2009.

References

1. McCallum R.W. e. a. Practical Aspects of Modern and Future Permanent Magnets. Annual Rev. Materials Research. 2014;44:451—477.

2. Smilyanets L.V., Litvinenko T.P. Ispol'zovanie Individual'nykh Ekologichnykh Transportnykh Sredstv v Ulichno-dorozhnoy Strukture Naseleennogo Punkta. Novye Idei Novogo Veka: Materialy Mezhdunar. Nauch. Konf. Khabarovsk: Izd-vo Tikhookeanskogo Gos. Un-ta, 2013;2:428—433. (in Russian).

3. Ageev A.N., Aytenov A.A., Cheboksarov A.N. Klassifikatsiya Dvukhkolesnogo Elektrotransporta v Razlichnykh Stranakh Mira. Tekhnika i Tekhnologii Stroitel'stva. 2020;2(22):4—8. (in Russian).

4. Grukhler G. Krants Y., Zavishka T. Sistemy Elektroprivoda dlya Transportnykh Sredstv — Kontseptsii, Primery Energoberezeniya. Elektrotekhnicheskie i Komp'yuternye Sistemy. 2011;3(79):123—127. (in Russian).

5. Ostroverkhov M. Trinchuk D. Study into Energy Efficiency of the Drive of Electric Vehicles with an Independent Power Supply Depending on the Configuration of the Power Source. Technology Audit and Production Reserves. 2018;4;1(42):45—50.

6. Libert F. Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-speed Direct-driven mixer. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2004.

7. Lindegger M. Economic Viability, Applications and Limits of Efficient Permanent Magnet Motors. Switzerland: Swiss Federal Office of Energy, 2009.

8. Шевченко А.Ф., Честюнина Т.В. Анализ магнитодвижущих сил дробных зубцовых обмоток электрических машин // Электротехника. 2009. № 12. С. 3—7.

9. Бухгольц Ю.Г., Приступ А.Г., Честюнина Т.В. К вопросу расчета индуктивностей дробных зубцовых обмоток // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2012. № 1. С. 48—52.

10. Евстратов А.Э. Обзор возможных систем управления электроприводом на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: Сборник материалов I Всерос. науч.-практ. конф. Кемерово: Изд-во Кузбасского гос. техн. ун-та им. Т.Ф. Горбачева, 2014. С. 71.

11. Давыдкин М.Н. Разработка модели синхронного двигателя на постоянных магнитах для электропривода транспортных средств // Наука и производство Урала. 2016. № 12. С. 48—52.

12. Петров Г.Н. Электрические машины. Ч. 2. Асинхронные и синхронные машины. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1968.

13. Копылов И.П. и др. Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2002.

14. Gieras Ja.E., Wing M. Permanent Magnet Motor Technology. N.-Y.: Marcel Dekker Inc, 2002.

8. Shevchenko A.F., Chestyunina T.V. Analiz Magnitodvizhushchikh Sil Drobnykh Zubtsovykh Obmotok Elektricheskikh Mashin. Elektrotehnika. 2009;12:3—7. (in Russian).

9. Bukhhol'ts Yu.G., Pristup A.G., Chestyunina T.V. K voprosu Rascheta Induktivnostey Drobnykh Zubtsovykh Obmotok. Elektro. Elektrotehnika, Elektroenergetika, Elektrotehnicheskaya Promyshlennost'. 2012;1:48—52. (in Russian).

10. Evstratov A.E. Obzor Vozmozhnykh Sistem Upravleniya Elektroprivodom na Baze Sinkhronnogo Dvigatelya s Postoyannymi Magnitami. Energetika i Energoberezhnie: Teoriya i Praktika: Sbornik Materialov I Vseros. Nauch.-prakt. Konf. Kemerovo: Izd-vo Kuzbasskogo Gos. Tekhn. Un-ta im. T.F. Gorbacheva, 2014:71. (in Russian).

11. Davydkin M.N. Razrabotka Modeli Sinkhronnogo Dvigatelya na Postoyannykh Magnitakh dlya Elektroprivoda Transportnykh Sredstv. Nauka i Proizvodstvo Urala. 2016;12:48—52. (in Russian).

12. Petrov G.N. Elektricheskie Mashiny. Ch. 2. Asinkhronnye i Sinkhronnye Mashiny. M.-L.: Gosenergoizdat, 1968. (in Russian).

13. Kopylov I.P. i dr. Proektirovanie Elektricheskikh Mashin. M.: Vysshaya Shkola, 2002. (in Russian).

14. Gieras Ja.E., Wing M. Permanent Magnet Motor Technology. N.-Y.: Marcel Dekker Inc, 2002.

Сведения об авторах:

Соколова Елена Михайловна — кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов НИУ «МЭИ», e-mail: SokolovaYM@mpei.ru

Белов Артем Дмитриевич — студент 5-го курса кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов НИУ «МЭИ», e-mail: BelovAD@mpei.ru

Information about authors:

Sokolova Elena M. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electromechanics, Electrical and Electronic Apparatuses Dept., NRU MPEI, e-mail: SokolovaYM@mpei.ru

Belov Artem D. — 5th Year Student of Electromechanics, Electrical and Electronic Apparatuses Dept., NRU MPEI, e-mail: BelovAD@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 29.04.2021

The article received to the editor: 29.04.2021