

**СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ  
И ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ»**

SECTION «SIMULATION OF MECHATRONIC SYSTEMS AND ELECTRIC DRIVE  
WITH SEMICONDUCTOR CONVERTERS, ELECTROMECHANICAL  
AND ELECTROPHYSICAL PROCESSES AND DEVICES»

УДК 621.86

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee8d81c4.71775363

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ  
ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ МЕХАНИЗМОВ  
ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН**

**Кирилл Александрович Гончаров**

Брянский государственный технический университет, зав. каф. «Подъемно-транспортные машины и оборудование», доцент, к.т.н.

Россия, Брянск, ptm\_bstu@mail.ru

*Аннотация. Приведен способ математического синтеза уравнений механических характеристик электродвигателя с фазным ротором, соответствующих различным ступеням сопротивлений в цепи ротора и аппроксимируемых прямыми, при моделировании неустановившегося движения механизмов подъемно-транспортных машин.*

*Ключевые слова: математическое моделирование, механические характеристики, электродвигатель с фазным ротором, механизмы подъемно-транспортных машин.*

**MATHEMATICAL MODELING OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS  
OF ELECTRIC MOTORS WITH A PHASE ROTOR UNDER STABLE MOTION  
OF MECHANISMS OF LIFTING AND TRANSPORTATION MACHINES**

Kirill A. Goncharov

Bryansk State Technical University, head of the Department "Handling machinery and equipment", associate professor, candidate of technical sciences, Russia, Bryansk, ptm\_bstu@mail.ru

*Abstract. A method of mathematical synthesis of the equations of the mechanical characteristics of an electric motor with a phase rotor, corresponding to various resistance steps in the rotor circuit and approximated by straight lines, when simulating the unsteady movement of the mechanisms of hoisting-and-transport machines, is presented.*

*Keywords: mathematical modeling, mechanical characteristics, electric motor with a phase rotor, mechanisms of hoisting-and-transport machines.*

Моделирование переходных процессов в механизмах подъемно-транспортных машин является актуальной задачей в связи с развитием систем управления электроприводом на основе преобразователей частоты тока питающей сети. При этом «классические» системы управления при

применении электродвигателей с фазным ротором являются более экономичным решением [1], что в совокупности с требованиями, устанавливаемыми к скоростям механизмов и точности позиционирования элементов подъемно-транспортных машин, в определенных проектных случаях является более обоснованным вариантом реализации.

Стоит отметить, что методики подбора сопротивлений в цепи ротора довольно часто не коррелируется с процессами, происходящими непосредственно в механизме [2; 3], а именно:

- с приведенными массами и моментами инерции;
- количеством необходимых ступеней при пуске, каждая из которых реализует ускорение элементов механизма, не превышающее допустимых значений;
- временными отрезками работы электродвигателя на различных ступенях, позволяющими осуществить общий плавный пуск механизма;
- моментами перехода с одной ступени механической характеристики на другую.

В настоящей работе предлагается описание способа математического синтеза уравнений механических характеристик электродвигателя с фазным ротором, соответствующих различным ступеням сопротивлений в цепи ротора и аппроксимируемых прямыми, при моделировании неустановившегося движения механизмов подъемно-транспортных машин, позволяющего учесть описанные выше факторы.

Вид механической характеристики электродвигателя при моделировании движения любого механизма определяет функцию (уравнение) движущего момента, встраиваемого в соответствующую часть общего уравнения движения, записываемого, в данном случае, в дифференциальной форме. При построении динамической модели механические характеристики электродвигателей с достаточной степенью точности можно аппроксимировать набором прямых, сменяющих друг друга при достижении ротором определенных скоростей. Механическую характеристику электродвигателя с фазным ротором можно представить в виде, показанном на рис. 1.

Каждый участок механической характеристики задается уравнением прямой. Для участков 1 – 4

$$M = A + B \left( \frac{30\omega_{\text{пр}}}{\pi} \right), \quad (1)$$

где  $A$  и  $B$  – коэффициенты в уравнении;  $\omega_{\text{пр}}$  – угловая скорость звена привода (вала электродвигателя).

Коэффициенты  $A$  и  $B$  определяются из уравнения прямой

$$M = A + Bn, \quad (2)$$

где  $n$  – частота вращения вала электродвигателя.

Прямая 1 проходит через две точки с координатами  $[n_c; 0]$  и  $[n_{\text{ном}}; M_{\text{ном}}]$ , где  $n_{\text{ном}}$  – номинальная частота вращения вала электродвигателя (об/мин),  $M_{\text{ном}}$

– номинальный крутящий момент, развиваемый электродвигателем,  $n_c$  – синхронная частота вращения вала электродвигателя.

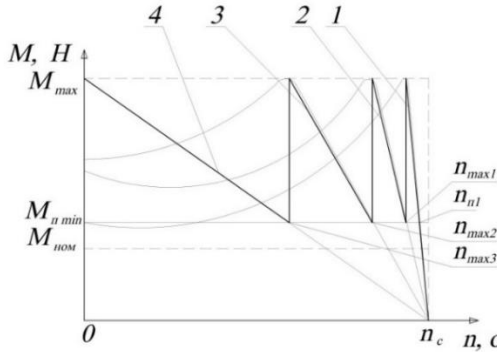


Рисунок 1 – Преобразование механической характеристики электродвигателей с фазным ротором

Прямая (2), соответствующая участку 4, проходит через точки  $[n_c; 0]$  и  $[0; M_{max}]$ .

Минимальный пусковой момент  $M_{n \min}$  определяется подбором сопротивлений в цепи ротора. При пуске двигателя с пусковым моментом  $M_{\Pi} = M_{max}$  (рис. 1) минимальный пусковой момент  $M_{\Pi \min}$ , а также параметры  $n_{n1}$ ,  $n_{max2}$ ,  $n_{max3}$  определяются из решения системы уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{M_{max} - M_{n \min}}{M_{max}} = \frac{n_{n1} - n_{max1}}{n_c - n_{max1}}; \\ \frac{M_{max} - M_{n \min}}{M_{max}} = \frac{n_{max1} - n_{max2}}{n_c - n_{max2}}; \\ \frac{M_{max} - M_{n \min}}{M_{max}} = \frac{n_{max2} - n_{max3}}{n_c - n_{max3}}; \\ \frac{M_{max} - M_{n \min}}{M_{max}} = \frac{n_{max3}}{n_c}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Прямая 2 (рис. 1) пройдет через точки  $[n_c; 0]$  и  $[n_{max1}; M_{\Pi \min}]$ , прямая 3 – через точки  $[n_c; 0]$  и  $[n_{max2}; M_{\Pi \min}]$ . Величину  $n_{max1}$  определяют подстановкой  $M_{max}$  в уравнение прямой для участка 1.

На примере кранового электродвигателя МТН 412-8 (4 пары полюсов,  $n_c = 750$  об/мин,  $M_{ном} = 293,8$  Нм) механическая характеристика для четырех ступеней переключения задается четырьмя уравнениями прямой (рис. 1).

Уравнение прямой, соответствующей участку 1 механической характеристики

$$M_1 = 6296,7 - 8,396 n .$$

Подставляя в это уравнение вместо  $M_1$  параметр  $M_{max} = 882$  Нм, получим  $n_{max1} = 645$  об/мин.

Остальные, необходимые для построения механической характеристики, параметры, определяются решением системы уравнений (3).

$$\begin{cases} \frac{882 - M_{n\min}}{882} = \frac{n_{n1} - 645}{750 - 645}; \\ \frac{882 - M_{n\min}}{882} = \frac{645 - n_{\max2}}{750 - n_{\max2}}; \\ \frac{882 - M_{n\min}}{882} = \frac{n_{\max2} - n_{\max3}}{750 - n_{\max3}}; \\ \frac{882 - M_{n\min}}{882} = \frac{n_{\max3}}{750}. \end{cases}$$

Таким образом,  $M_{n\min} = 457,7$  Нм;  $n_{n1} = 695,5$  об/мин;  $n_{\max2} = 547,8$  об/мин;  $n_{\max3} = 360,6$  об/мин.

Уравнение прямой, соответствующей участку 4 механической характеристики

$$M_4 = 881,538 - 1,175 n .$$

Уравнение прямой, соответствующей участку 3 механической характеристики

$$M_3 = 1697,7 - 2,264 n .$$

Уравнение прямой, соответствующей участку 2 механической характеристики

$$M_2 = 3269,56 - 4,359 n .$$

При дальнейшем решении уравнений движения в качестве аргумента в полученных зависимостях целесообразно использовать угловую скорость  $\omega_{пр}$  в соответствии с зависимостью (1).

Предложенный в настоящей работе способ математического синтеза уравнений механических характеристик электродвигателя с фазным ротором позволяет создавать математическое описание различных ступеней механической характеристики на основе критерия равенства крутящих моментов при их переключении, что является достаточным входным условием для подбора величин сопротивлений в цепи ротора.

#### Список литературы

1. Гончаров, К. А. Сравнительный стоимостной анализ комплектаций приводов ленточных конвейеров / К. А. Гончаров // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы международной научно-практической конференции, Белгород, 15–17 октября 2020 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 101-107.

2. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. Т. 1 / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

3. Александров, М.П. Грузоподъемные машины: учебник для вузов/М.П. Александров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана – Высшая школа, 2000. – 552 с.

*Материал принят к публикации 05.10.21.*