

К.В. Толкачев, А.А. Пугачев

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)
K.V. Tolkachev, A.A. Pugachev (Bryansk, Bryansk State Technical University)**СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОВОРОТНЫМ СТАТОРОМ****STATIC CHARACTERISTICS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE
WITH ROTARY STATOR**

Предложен новый способ управления по скорости асинхронным электроприводом с фазным ротором. Рассмотрены статические условия работы, приведены выражения для расчета электромагнитных моментов, коэффициентов мощностей и других энергетических параметров.

The new way of control by speed the asynchronous electric drive with the phase-wound rotor is offered. A static conditions of work are considered, expressions for calculation of the electromagnetic moments, factors of capacities and other power parameters are given.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, электропривод, энергоэффективность, потери, мощность, энергия.

Keywords: asynchronous electric motor, electric drive, energy efficiency, losses, power, energy.

С развитием математических моделей связаны основные успехи в теории электропривода. Так с уравнениями установившихся режимов связан первый этап развития теории электромеханического преобразования энергии. С помощью комплексных уравнений можно описать процессы преобразования энергии в электрических машинах в установившихся режимах. Для схемы замещения одной фазы электродвигателя (рис. 1), соответствующей схеме включения асинхронного электропривода [1], содержащего два двигателя с фазным ротором, при питании от сети с синусоидальным напряжением \bar{u}_{s1} и \bar{u}_{s2} , при выполнении статора второго асинхронного двигателя поворотным и при допущении, что параметры обоих двигателей одинаковые, они выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} \bar{u}_{s1} = \bar{i}_{s1} \cdot R_s + j \cdot \bar{i}_{s1} \cdot x_s + \bar{E}_{s1}; \\ \bar{E}_{r1} + \bar{E}_{r2} = \bar{i}_r \cdot R'_{r\Sigma} / s + j \cdot \bar{i}'_r \cdot x'_{r\Sigma}; \\ \bar{u}_{s2} = \bar{i}_{s2} \cdot R_s + j \cdot \bar{i}_{s2} \cdot x_s + \bar{E}_{s2}, \end{cases} \quad (1)$$

где \bar{i}_{s1} , \bar{i}_{s2} , \bar{i}'_r - токи статоров и приведенный ток роторов соответственно; R_s , $R'_{r\Sigma}$ - активное сопротивление статора и приведенное активное

сопротивление ротора соответственно; $x_s, x'_{r\Sigma}$ - индуктивное сопротивление ротора и индуктивное приведенное сопротивление ротора соответственно; $\bar{E}_{s1}, \bar{E}_{s2}, \bar{E}_{r1}, \bar{E}_{r2}$ - ЭДС статоров и роторов соответственно.

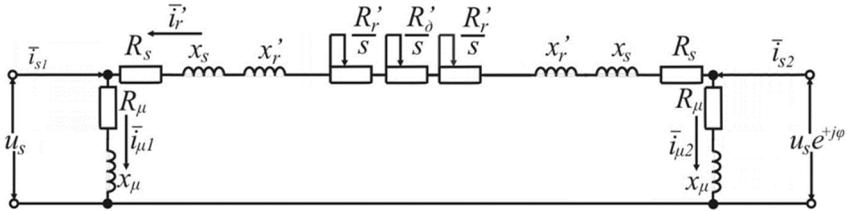


Рис.1. Схемы замещения фазы асинхронного электропривода

При повороте статора второго двигателя на угол φ ток в роторе первого двигателя, выраженный в комплексной форме и приведенный к статору, определится:

$$i_{r1} = \frac{u_s - u_s e^{\pm j\varphi}}{2(R_s + R'_{r\Sigma} / 2s + jx_k)} \quad (2)$$

где $x_k = x_s + x'_r$

В случае поворота статора в направлении вращения поля после преобразования выражения (2) получим:

$$i_{r1} = \frac{u_s}{2} \frac{(R_s + R'_{r\Sigma} / 2s)(1 - \cos\varphi) + x_k \sin\varphi - j(x_k(1 - \cos\varphi) - (R_s + R'_{r\Sigma} / 2s)\sin\varphi)}{(R_s + R'_{r\Sigma} / 2s)^2 + x_k^2} \quad (3)$$

Выражение для тока ротора второго двигателя при том же направлении поворота статора:

$$i_{r2} = \frac{u_s}{2} \frac{(R_s + R'_{r\Sigma} / 2s)(1 - \cos\varphi) - x_k \sin\varphi - j(x_k(1 - \cos\varphi) + (R_s + R'_{r\Sigma} / 2s)\sin\varphi)}{(R_s + R'_{r\Sigma} / 2s)^2 + x_k^2} \quad (4)$$

Активная электромагнитная мощность, передаваемая через воздушный зазор ротору двигателя в нормальном приводе [2], может быть записана в виде:

$$P_{sr} = 3i_{ra} \cdot R'_{r\Sigma} / s = \frac{3u_s^2 \cdot R'_{r\Sigma}}{s \cdot \left((R_s + R'_{r\Sigma} / s)^2 + x_k^2 \right)} \quad (5)$$

где i_{ra} - активная составляющая тока ротора.

Активная электромагнитная мощность, передаваемая через воздушный зазор ротору двигателя, может быть записана в другом виде:

$$P_{sr} = M\omega_0 \quad (6)$$

Приравнявая (5) и (6), получим уравнение статической механической характеристики двигателя в виде зависимости:

$$M = \frac{3i_{ra} \cdot R'_{r\Sigma}}{\omega_0 \cdot s} = \frac{3u_s^2 \cdot R'_{r\Sigma}}{\omega_0 \cdot s \cdot \left((R_s + R'_{r\Sigma} / s)^2 + x_k^2 \right)} \quad (7)$$

При этом активная составляющая тока ротора:

$$i_{ra} = \frac{u_s \cdot (R_s + R'_{r\Sigma} / s)}{(R_s + R'_{r\Sigma} / s)^2 + x_k^2} \quad (8)$$

Момент каждого двигателя в рассматриваемом электроприводе:

$$M_{1,2} = \frac{3i'_{r(1,2)a} \cdot R'_{r\Sigma}}{\omega_0 \cdot s} = M \cdot i'_{r(1,2)a} / i_{ra} \quad (9)$$

Из (3) и (4) получим активные составляющие тока ротора первого и второго двигателей:

$$i'_{r(1,2)a} = \frac{u_s}{2} \frac{(R_s + R'_{r\Sigma} / 2s)(1 - \cos\varphi) \pm x_k \sin\varphi}{(R_s + R'_{r\Sigma} / 2s)^2 + x_k^2} \quad (10)$$

Подставив в (10) выражения (9), (11) и выполнив соответствующие алгебраические и тригонометрические преобразования, получим:

$$M_{1,2} = \frac{M}{2} \left(1 - \cos\varphi \pm \frac{x_k}{R_s + R'_{r\Sigma} / s} \sin\varphi \right) \quad (11)$$

Выражение для электромагнитного момента (8) представим в виде уточненной формулы Клосса и подставим в (12):

$$M_{1,2} = \frac{M_k(1 + a \cdot s_k)}{s / s_k + s_k / s + 2a \cdot s_k} \left(1 - \cos\varphi \pm \frac{\sqrt{1 - (a \cdot s_k)^2}}{a \cdot s_k \cdot s + s_k} s \cdot \sin\varphi \right) \quad (12)$$

Из анализа выражения (13) следует, что момент, развиваемый первым двигателем при любых значениях угла φ и положительном значении скольжения s , всегда положительный. Момент второго двигателя может быть отрицательным, когда

$$s > R_r \frac{\cos\varphi - 1}{x_k \cdot \sin\varphi + R_s \cdot \cos\varphi - R_s} \quad (13)$$

Если принять сопротивление статора $R_s = 0$ [1], то (12) и (14) упрощаются:

$$M_{1,2} = \frac{M}{2} \left(1 - \cos\varphi \pm \frac{s}{s_k} \sin\varphi \right) \quad (14)$$

Как следует из выражений (12), (15) момент, развиваемый каждым двигателем, является функцией двух переменных величин: угла поворота статора второго двигателя φ и скольжения s двигателей. В результате максимальный момент каждого двигателя определяется двумя условиями:

$$\frac{\partial M}{\partial s} = 0; \quad \frac{\partial M}{\partial \varphi} = 0. \quad (15)$$

Совместное решение этих уравнений дает значения φ и s , при одновременном наличии которых момент каждого двигателя максимальный.

Анализ зависимостей моментов двигателей от угла поворота статора и скольжения позволяет произвести правильный выбор значения критического скольжения s_k с целью более равномерной загрузки двигателей, рассчитать их токи, произвести выбор исполнительного механизма для поворота статора и др.

Как следует из результатов выполненного анализа, максимальный момент, развиваемый первым двигателем, может составлять $1,3 M_k$, то есть на 30% превышать максимальный момент того же асинхронного двигателя в обычной схеме включения. При повороте статора в противоположном направлении по отношению к направлению вращения его поля, максимальный момент, равный $1,3 M_k$, будет развивать второй двигатель.

Так как оба двигателя механически связаны, то развиваемый ими результирующий момент равен:

$$M = M_1 + M_2 = \frac{2M_k(1 + a \cdot s_k)}{s/s_k + s_k/s + 2a \cdot s_k} (1 - \cos \varphi) \quad (16)$$

Анализ формулы (18) показывает, что с увеличением угла поворота статора φ момент, развиваемый приводом при данном скольжении возрастает. При угле $\varphi = 180^\circ$ эл. он распределяется между двигателями поровну. При этом каждый двигатель работает независимо на общий вал, как в обычной схеме включения.

Таким образом, электропривод с электродвигателем с поворотным статором содержит два серийных асинхронных двигателя с фазными роторами [1], установленными на одном валу; один из двигателей выполнен с возможностью поворота его статора. Электропривод с поворотным статором, являясь достаточно простым, обладает недостатком, который заключается в том, что в нем теряется энергия скольжения. Однако, этот недостаток можно устранить либо применением асинхронных двигателей с повышенным скольжением, либо заменой внешнего добавочного сопротивления термозлектрической батареей. В результате электрическая энергия скольжения используется для охлаждения среды, охлаждающей объект регулирования температуры (дизель, газотурбинный двигатель, тяговая электрическая машина, тяговая полупроводниковая установка, тяговый трансформатор и др.)

Список литературы

1. *Космодамианский, А.С.* Системы скалярного управления тяговым асинхронным двигателем / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.С. Пугачев // Электротехника. – 2016. – № 9. – С. 44 – 50.

2. *Иньков, Ю.М.* Оптимизация энергетических характеристик электропривода вспомогательных механизмов тягового подвижного состава / Ю.М. Иньков, А.А. Пугачев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 6. – С. 43 – 47.

Материал поступил в редколлегию 21.10.19.