

## НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ОБОБЩЕННОЙ МАШИНЫ

The article gives the calculation methods of equivalent schema parameters of asynchronous motor which are received on the base of generalized machine theory.

Современное полиграфическое производство, начиная от печатных машин и кончая многочисленным вспомогательным оборудованием, в том числе принтерами, сканерами и т. п., для увеличения производительности и повышения качества выпускаемой продукции насыщено различного рода автоматизированными системами управления, в состав которых входят электромеханические устройства. Особый интерес представляет главная электромеханическая система – электропривод – основной источник механической энергии, приводящий в движение полиграфическое оборудование.

В силу меньших весо-габаритных показателей по сравнению с двигателем постоянного тока асинхронный короткозамкнутый электродвигатель при современном состоянии полупроводниковой техники получает наибольшее применение в полиграфическом оборудовании. Развитие теории и практика управления электроприводом позволило с использованием микропроцессорных систем повысить управляемость машин переменного тока при частотном способе регулирования ее координат. Регулирование координат в таких системах происходит в реально масштабе времени с учетом текущего изменения параметров электромеханического преобразователя – электродвигателя. Выявление этих изменений можно выполнять различными способами, но корректнее всего это делается на основе текущего измерения координат электродвигателя с последующим вычислением параметров его схемы замещения и использование их для коррекции закона частотного управления электроприводом, а значит, и оборудованием.

Современная теория и практика регулируемого электропривода переменного тока на основе асинхронной машины базируется на теории обобщенной машины. Весьма опрометчиво было бы использовать параметры схемы замещения, определяемые на основании классической теории асинхронной машины для упомянутых расчетов, поскольку при обосновании того или иного метода расчета параметров схемы замещения принимаются различного рода допущения, что влияет на точность вычисления. Эти допущения весьма значительны по сравнению с допущениями, используемыми в теории обобщенной машины для описания режимов работы асинхронного двигателя. Примером существенного различия допущений является использование Г-образной и Т-образной схемы замещения, последняя из которых более точно описывает асинхронную машину, хотя и она заменила электромагнитносвязанную систему на электрически взаимодействующие контуры.

Во избежание влияния различных неточностей и допущений на точность определения параметров схемы замещения было бы рационально разработать метод их определения на основе теории обобщенной машины. Выберем из различных систем координат, используемых в этой теории, систему  $\alpha - \beta$  и рассмотрим векторную диаграмму асинхронной машины для установившегося режима, т. е.

$$\bar{u}_s = I_s R_s + j\omega_s \bar{\Psi}_s,$$

где  $u_s$  – напряжение на обмотке статора;  $I_s$  – ток в обмотке статора;  $R_s$  – активное сопротивление обмотки статора;  $\omega_s$  – угловая скорость вращения магнитного поля статора;  $\bar{\Psi}_s$  – потокосцепление статора.

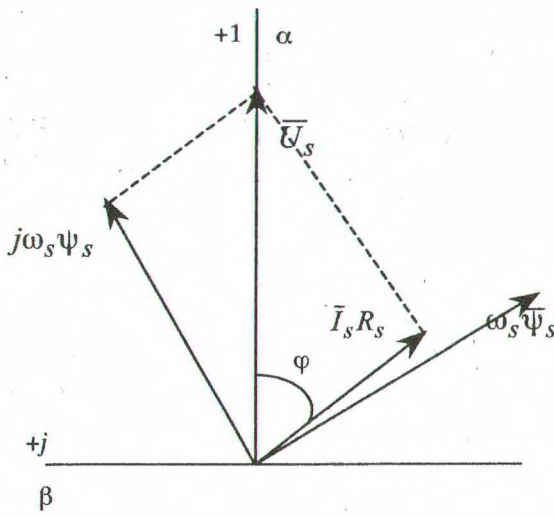


Рис.

Рассмотрение проводится для асинхронной машины с числом пар полюсов, равных единице. Для ее рассмотрения расположим вектор напряжения вдоль оси  $\alpha$  выбранной системы координат (см. рис.).

Тогда проекция вектора напряжения статора на ось  $\beta$  равна нулю. Следовательно,  $U_{s\beta} = \overline{U_s} \cdot 0$ . Запишем выражения для составляющих вектора напряжения:

$$\begin{aligned} u_{s\alpha} &= i_{s\alpha} R_s - \psi_{s\beta} \omega_s, \\ u_{s\beta} &= i_{s\beta} R_s + \psi_{s\alpha} \omega_s. \end{aligned} \quad (1)$$

Для номинального режима работы асинхронной машины на основании векторной диаграммы и приведенных выше формул можно вывести выражения составляющих потокосцепления статора и его модуля:

$$\psi_{s\alpha, \text{ном}} = \frac{|\overline{I}_{s, \text{ном}}| \sin \varphi_{\text{ном}} R_s}{\omega_{s, \text{ном}}}; \quad \psi_{s\beta, \text{ном}} = \frac{|\overline{I}_{s, \text{ном}}| \cos \varphi_{\text{ном}} R_s - |\overline{u}_{s, \text{ном}}|}{\omega_{s, \text{ном}}}; \quad |\overline{\psi}_{s, \text{ном}}|^2 = \psi_{s\alpha, \text{ном}}^2 + \psi_{s\beta, \text{ном}}^2$$

В последующем все выкладки проводятся для номинальной точки, поэтому для упрощения индекс, обозначающий принадлежность к номинальному режиму, опускается.

Для дальнейшего рассмотрения расположения векторов статора в системе координат  $\alpha - \beta$  можно записать следующую систему уравнений, описывающую режим работы асинхронной машины:

$$\begin{aligned} 0 &= |\overline{u}_s| - a_{11} \psi_{s\alpha} + a_{12} \psi_{r\alpha} + \omega_s \psi_{s\beta}; \\ 0 &= 0 - a_{11} \psi_{s\beta} + a_{12} \psi_{r\beta} - \omega_s \psi_{s\alpha}; \\ 0 &= 0 + a_{21} \psi_{s\alpha} - a_{22} \psi_{r\alpha} + \delta \psi_{r\beta}; \\ 0 &= 0 + a_{21} \psi_{s\beta} - a_{22} \psi_{r\beta} - \delta \psi_{r\alpha}. \end{aligned} \quad (2)$$

где  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{22}$  – коэффициенты, определяемые параметрами схемы замещения;  $\delta = \omega_s - \omega_r$  – параметр абсолютного скольжения;  $\omega_r$  – частота вращения ротора.

Решим два последних уравнения системы (2) и получим выражения для составляющих потокосцепления ротора по соответствующим осям системы координат:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{r\alpha} &= \frac{a_{12} \cdot (a_{22} \psi_{s\alpha} + \delta \psi_{s\beta})}{a_{22}^2 + \delta^2} \\ \psi_{r\beta} &= \frac{a_{21} \cdot (a_{22} \psi_{s\beta} - \delta \psi_{s\alpha})}{a_{22}^2 + \delta^2} \end{aligned} \right\}$$

Подставим полученные выражения в первые два уравнения системы (2) и получим

$$\begin{aligned} 0 &= |\bar{u}_s| + a_3 \frac{a_{22} \psi_{s\alpha} + \psi_{s\beta} \delta}{a_{22}^2 + \delta^2} - a_{11} \psi_{s\alpha} + \omega_s \psi_{s\beta}; \\ 0 &= 0 + a_3 \frac{a_{22} \psi_{s\beta} - \psi_{s\alpha} \delta}{a_{22}^2 + \delta^2} - a_{11} \psi_{s\beta} - \omega_s \psi_{s\alpha}, \end{aligned}$$

где  $a_3 = a_{12} a_{21}$ .

Из этих двух уравнений можно получить выражения для  $a_{11}$  и  $a_3$ , решив эти уравнения относительно них:

$$a_{11} = \frac{-a_{22} (|\bar{u}_s| \psi_{s\beta} + \omega_s |\bar{\psi}_s|^2) + |\bar{u}_s| \delta \psi_{s\alpha}}{\delta |\bar{\psi}_s|^2}; \quad (3)$$

$$a_3 = \frac{-(a_{22}^2 + \delta^2) (|\bar{u}_s| \psi_{s\beta} + \omega_s |\bar{\psi}_s|^2)}{\delta |\bar{\psi}_s|^2}. \quad (4)$$

Воспользуемся выражением для номинального момента, выведенного на основании теории обобщенной машины:

$$M = \frac{3 \cdot |\bar{U}_s|^2 \cdot \delta}{2 \cdot R_s} \cdot \frac{a_{12} \cdot a_{21}}{A^2 + B^2},$$

где  $A = b - \omega_s \cdot \delta$ ;  $B = a_{22} \cdot \omega_s + a_{11} \cdot \delta$ ;  $b = a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21}$ , и получим выражения для следующих коэффициентов:

$$a_5 = \frac{A^2 + B^2}{a_{12} a_{21}} = \frac{3 |\bar{U}_s|^2 \delta}{2 R_s M_{\text{ном}}} \quad \text{или} \quad a_3 a_5 = A^2 + B^2.$$

С другой стороны, зная составляющие коэффициентов  $A$  и  $B$ , можно получить

$$a_3 a_5 = (a_{11}^2 + \omega_s^2) (\delta_k^2 + \delta^2) + 2 a_3 \omega_s \delta, \quad (5)$$

где  $\delta_k$  – параметр абсолютного критического скольжения.

Теперь воспользуемся выражением для максимального момента, полученного на основе теории обобщенной машины:

$$M_{\text{макс}} = \frac{3 |\bar{U}_s|^2 a_{12} a_{21}}{4 R_s (a_{11}^2 + \omega_s^2) \delta_k + a_{12} a_{21} \omega_s},$$

что дает возможность получить выражения для следующих коэффициентов:

$$a_4 = \frac{(a_{11}^2 + \omega_s^2) \delta_k}{a_{12} a_{21}} = \frac{3 |\bar{u}_s|^2}{4 R_s M_{\max}} - \omega_s \quad \text{или} \quad \delta_k = \frac{a_3 a_4}{a_{11}^2 + \omega_s^2}. \quad (6)$$

Подставим в (5) выражение (6) и получим:

$$a_3 a_5 = \frac{a_3^2 a_4^2}{a_{11}^2 + \omega_s^2} + \delta^2 (a_{11}^2 + \omega_s^2) + 2 a_3 \omega_s \delta.$$

Из этого выражения получается:

$$a_{11}^2 + \omega_s^2 = \frac{a_3 a_6}{2 \delta^2}, \quad \text{где} \quad a_6 = -(2 \omega_s \delta - a_5) - \sqrt{(2 \omega_s \delta - a_5)^2 - 4 \delta^2 a_4^2}.$$

Решим совместно уравнения (3), (4) и (7) относительно  $a_{22}$  и получим

$$a_{22} = \frac{2 |\bar{u}_s| \delta \psi_{s\alpha} + \delta \psi_{s\beta} \sqrt{\frac{-1}{k} \left[ (2k + a_7 |\bar{\psi}_s|^2) (a_7 k + 2 \omega_s^2 |\bar{\psi}_s|^2) + 2 |\bar{u}_s|^2 \psi_{s\alpha}^2 a_7 \right]}}{2k + a_7 |\bar{\psi}_s|^2},$$

$$\text{где} \quad k = (|\bar{u}_s| \psi_{s\beta} + \omega_s |\bar{\psi}_s|^2), \quad a_7 = \frac{a_6}{\delta} = -(2 \omega_s - a_8) - \sqrt{(2 \omega_s - a_8)^2 - 4 a_4^2}, \quad a_8 = \frac{a_5}{\delta} = \frac{3 |\bar{u}_s|^2}{2 R_s M_{\text{ном}}}.$$

Выражение для  $a_{22}$  на основе номинальных данных асинхронного двигателя позволяет получить определенное численное его значение. Численное значение  $a_{22}$  дает возможность по (3) вычислить значение коэффициента  $a_{11}$ , а по (4) – значение коэффициента  $a_3$ .

На основании полученных значений коэффициентов  $a_{11}$ ,  $a_{22}$  и  $a_3$  можно определить параметры схемы замещения по следующим выражениям:

$$L_s = \frac{a_{22} R_s}{a_{11} a_{22} - a_3}; \quad M = \frac{2 a_{22} a_3 R_s}{a_{11}^2 a_{22}^2 - a_3^2};$$

$$L_r = \frac{2 a_{11} a_{22}}{a_{11} a_{22} + a_3} M; \quad R_r = \frac{a_{22} R_s L_r}{a_{11} L_s},$$

где  $L_s = L_{s\sigma} + L_m$  – полная эквивалентная индуктивность фазы статора, состоящая из индуктивности от поля рассеяния  $L_{s\sigma}$  и главного потока  $L_m$ ;  $L_r = L_{r\sigma} + L_m$  – полная индуктивность фазы ротора.

Значение активного сопротивления обмотки статора  $R_s$ , наиболее часто встречаемого в справочной литературе, достаточно легко определяется опытным путем, а также может быть вычислено по формуле

$$R_s = U_{\text{л.ном}} \frac{(1 - \eta_{\text{ном}})}{3 \sqrt{3} \cdot I_{\text{л.ном}}},$$

В корректности значений полученных параметров схемы замещения можно убедиться утешительной проверкой значений номинального и максимального моментов и сравнений их с паспортными значениями. Для проведения этих расчетов необходимо вычислить такие коэффициенты, как  $a_{12}$  и  $a_{21}$ , по следующим выражениям:

$$a_{12} = \frac{L_m R_s}{L_s L_r - L_m^2} ; \quad a_{21} = \frac{L_m R_r}{L_s L_r - L_m^2} ,$$

а значение параметра абсолютного скольжения по формуле

$$\delta_k = \sqrt{\frac{b^2 + a_{22}^2 \omega_s^2}{a_{11}^2 + \omega_s^2}} .$$

**Выводы.** Метод вычисления значений параметров схемы замещения асинхронного двигателя основан на меньшем количестве допущений, что повышает точность их определения, а использование более точных параметров для расчетов в “домашней” системе уравнений установившихся и динамических режимов положительно скажется на их результатах.

Выражения по определению значений параметров достаточно легко решаются средствами современной микропроцессорной техники, и поэтому предлагаемый метод может быть запрограммирован в системе управления преобразователем частоты с целью управления асинхронной машиной в реальном масштабе времени, т. е. управления, реализующего учет изменения параметров схемы замещения от закона частотного управления  $U/f$ .