

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

В.Н. Мещеряков  
Р.С. Рысляев  
В.А. Зотов

**Общий принцип частотного регулирования угловой скорости асинхронного двигателя может быть реализован при различных законах управления с помощью большого разнообразия схемных решений [1,2,3]. При этом в процессе регулирования частоты вращения двигателя приходится решать задачу формирования мгновенных значений электромагнитного момента двигателя.**

Электромагнитный момент асинхронного двигателя определяется произведением двух обобщенных векторов переменных

$$M = \frac{m}{2} p L_m \operatorname{Im}(i_1 i_2^*) = \frac{m}{2} p \operatorname{Im}(i_1 \dot{\psi}_m^*) = \frac{m}{2} p \frac{L_m}{L_r} \operatorname{Im}(i_1 \dot{\psi}_r^*), \quad (1)$$

где  $m$  - число фаз машины;  $p$  - число пар полюсов;  $L_m$  - взаимная индуктивность обмотки статора и ротора;  $L_r$  - собственная индуктивность обмотки ротора;  $i_1$  - вектор тока статора;  $\dot{\psi}_m$  - вектор главного потокосцепления;  $\dot{\psi}_r$  - вектор главного потокосцепления ротора;  $\operatorname{Im}$  - операция взятия мнимой части комплексного числа; звездочкой обозначена операция комплексного сопряжения.

В приведенной формуле  $\operatorname{Im}(\dot{X} \dot{Y}^*) = |\dot{X}| |\dot{Y}| \sin(\gamma \wedge X)$ . Это соотношение может быть представлено в виде  $|\dot{Y}| x_2$ , где  $x_2 = |\dot{X}| \sin(\gamma \wedge X)$  - проекция вектора на ось ординат системы координат, связанной с вектором  $\dot{Y}$ .

Уравнение электромагнитного момента асинхронного двигателя при управлении по главному потокосцеплению можно представить в виде:

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot |i_1| \cdot |\dot{\psi}_m| \cdot \sin(\varphi_0), \quad (2)$$

где  $\varphi_0$  - угол между вектором тока статора и главным потокосцеплением.

Будем рассматривать ненасыщенный асинхронный двигатель.

Главное потокосцепление двигателя может быть выражено через ток намагничивания

$$\dot{\psi}_m = (i_1 + i_2') L_m = i_m \cdot L_m, \quad (3)$$

где  $L_m$  - взаимная индуктивность обмотки статора и ротора.

Составляющая тока статора  $i_m$ , синфазная главному потокосцеплению  $\dot{\psi}_m$ , определяется как векторная сумма тока статора  $i_1$  и тока ротора  $i_2'$ .

С учетом выражения (3) уравнение для электромагнитного момента двигателя можно рассматривать в виде

$$M = \frac{3}{2} p_n \cdot L_m \cdot |i_1| \cdot |i_m| \cdot \sin(\varphi_0). \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что электромагнитный момент двигателя пропорционален синусу угла  $\varphi_0$  между векторами тока статора и тока намагничивания. На рис.1 приведена векторная диаграмма токов и потокосцеплений асинхронного короткозамкнутого двигателя.

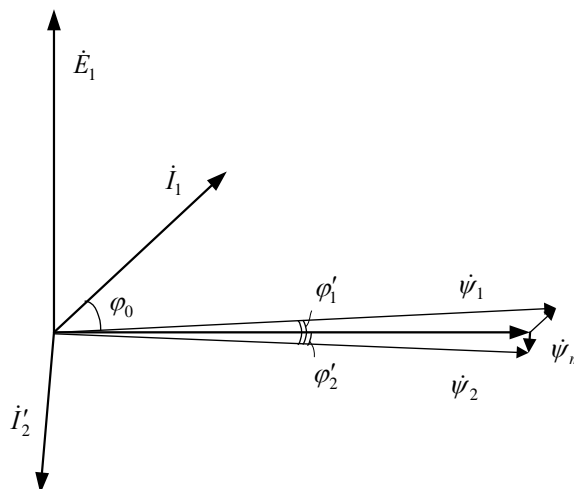


Рис.1. Векторная диаграмма токов и потокосцеплений асинхронного двигателя

Величина электромагнитного момента асинхронного электродвигателя пропорциональна площади, образуемой двумя результирующими векторами: вектором тока статора и вектором тока намагничивания. При построении систем векторного управления двигателем особенности формирования момента диктуют необходимость оказания такого управляющего воздействия, чтобы осуществлялась поддержка определенного взаимного положения вектора тока

статора и вектора магнитного потока сцепления, т.е. необходимо поддерживать на заданном уровне угол  $\varphi_0$ .

Если рассматриваются процессы при регулировании частоты  $f_1$ , то наиболее удобно регулируемые параметры представлять в относительных единицах

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1н}}; \quad (5)$$

$$\beta = \frac{f_2}{f_{1н}}. \quad (6)$$

Параметр  $\alpha$  является относительным значением частоты питания;

параметр  $\beta$  - абсолютным скольжением.

Для удобства описания частотно-управляемых электроприводов также используют понятие абсолютного отклонения угловой скорости ротора и относительного скольжения [4]. Абсолютное отклонение угловой скорости ротора определяется по формуле

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega, \quad (7)$$

где  $\omega$  - скорость вращения ротора.

Относительное скольжение

$$S_\alpha = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}. \quad (8)$$

Абсолютное и относительное скольжение связаны соотношениями

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \alpha \cdot S_\alpha, \quad (9)$$

где  $\omega_0$  - частота вращения поля статора при номинальной частоте  $f_{1н}$ .

При частотном управлении относительное значение первой гармоники напряжения питания двигателя определяется:

$$\gamma = \frac{U_1}{U_{1н}}. \quad (10)$$

Рассматривая схему замещения фазы АД (см. рис.2), в которой переменные и параметры схемы представлены в операторной форме, можно определить соотношения, а также передаточные функции между различными переменными АД.

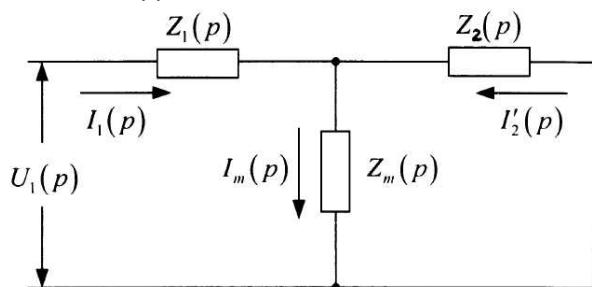


Рис. 2. Схема замещения фазы асинхронного двигателя

$$I_1(p) = \frac{U_1(p)}{Z_1(p) + \frac{Z_2(p) \cdot Z_m(p)}{Z_2(p) + Z_m(p)}}; \quad (11)$$

$$E_1(p) = U_1(p) - I_1(p)Z_1(p) = \frac{U_1(p) \cdot Z_2(p) \cdot Z_m(p)}{Z_1(p) \cdot Z_2(p) + Z_1(p) \cdot Z_m(p) + Z_2(p) \cdot Z_m(p)}; \quad (12)$$

$$I_m(p) = \frac{E_1(p)}{Z_m(p)} = U_1(p) \frac{Z_2(p)}{Z_1(p)Z_2(p) + Z_1(p)Z_m(p) + Z_2(p)Z_m(p)}, \quad (13)$$

$$I_2'(p) = \frac{E_2(p)}{Z_2(p)} = \frac{E_1(p)}{Z_2(p)} = I_1(p) \frac{Z_m(p)}{Z_2(p) + Z_m(p)}. \quad (14)$$

Сопротивления схемы замещения

$$Z_1(p) = L_{1\sigma}p + R_1; \quad (15)$$

$$Z_2(p) = L_{2\sigma}'p + \frac{R_2'}{S_\alpha}; \quad (16)$$

$$Z_m(p) = L_m p, \quad (17)$$

где  $L_m$  - индуктивность рассеивания обмотки статора;  $L_{2\sigma}'$  - приведенная индуктивность рассеивания обмотки ротора;  $L_m$  - индуктивной контура намагничивания;  $R_1$  - активное сопротивление обмотки статора;  $R_2'$  - приведенное активное сопротивление обмотки ротора.

В общем случае при частотном управлении параметры двигателя зависят от относительного скольжения  $S_\alpha$ , определяемого в соответствии с выражением (8).

Потокосцепления двигателя в операторной форме определяются

$$\psi_1(p) = I_1(p) \cdot (L_{1\sigma} + L_m) + I_2'(p) \cdot L_m; \quad (18)$$

$$\psi_2(p) = I_2'(p) \cdot (L_{2\sigma}' + L_m) + I_1(p) \cdot L_m; \quad (19)$$

$$\psi_m = I_m(p) \cdot L_m. \quad (20)$$

Передаточные функции имеют вид

$$W(p) = \frac{\psi_1(p)}{I_1(p)} = L_1 \cdot \frac{T_A p + 1}{T_2 p + 1}; \quad (21)$$

$$W(p) = \frac{\psi_2(p)}{I_2'(p)} = L_m \cdot \frac{2T_2 p + 1}{T_2 p + 1}, \quad (22)$$

где

$$T_A = (L_2' + \frac{L_m^2}{L_1}) \cdot \frac{S_\alpha}{R_2'}; \quad (23)$$

$$T_2 = \frac{L_2' \cdot S_\alpha}{R_2'}; \quad (24)$$

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m; \quad (25)$$

$$L_2' = L_{2\sigma}' + L_m. \quad (26)$$

Остановимся более детально на рассмотрении передаточной функции между переменными  $I_1(p)$  и  $I_m(p)$ .

$$W(p) = \frac{I_m(p)}{I_1(p)} = \frac{Z_2(p)}{Z_2(p) + Z_m(p)}, \quad (27)$$

Выражение (27) может быть приведено к виду:

$$W(p) = \frac{I_m(p)}{I_1(p)} = \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}, \quad (28)$$

где

$$T_1 = \frac{L'_{2\sigma} \cdot S_\alpha}{R'_2}; \quad (29)$$

$$T_2 = \frac{(L'_{2\sigma} + L_m) \cdot S_\alpha}{R'_2}. \quad (30)$$

Используя передаточную функцию (28), можно определить частотные характеристики звена, отражающие изменения взаимного положения векторов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_m$  при изменении подводимой частоты  $\omega$ , а также изменения относительного скольжения  $S_\alpha$ .

$$A(\omega) = \frac{|I_m|}{|I_1|} = \frac{\sqrt{(T_1 \cdot \omega)^2 + 1}}{\sqrt{(T_2 \cdot \omega)^2 + 1}}; \quad (31)$$

$$L(\omega) = 20 \lg \sqrt{(T_1 \cdot \omega)^2 + 1} - 20 \lg \sqrt{(T_2 \cdot \omega)^2 + 1}; \quad (32)$$

$$\varphi_0 = \arctg T_1 \cdot \omega - \arctg T_2 \cdot \omega, \quad (33)$$

где  $A(\omega)$  - выражение для амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), характеризующее изменение соотношений модулей векторов токов при изменении частоты  $\omega$ ;  $\varphi_0(\omega)$  - выражение для фазовой частотной характеристики (ФЧХ), характеризующее изменение угла между векторами токов при изменении частоты  $\omega$ .

На основании выражения (31) можно записать

$$|I_m| = |I_1| \cdot \frac{\sqrt{(T_1 \cdot \omega)^2 + 1}}{\sqrt{(T_2 \cdot \omega)^2 + 1}}. \quad (34)$$

Подставив данное выражение, а также выражение (33) в выражение (4), получим

$$\begin{aligned} M &= \frac{3}{2} p_n \cdot L_m \cdot |\dot{I}_1|^2 \cdot A(\omega) \cdot \sin \varphi_0(\omega) = \\ &= \frac{3}{2} p_n \cdot L_m \cdot |\dot{I}_1|^2 \cdot \frac{\sqrt{(T_1 \cdot \omega)^2 + 1}}{\sqrt{(T_2 \cdot \omega)^2 + 1}} \cdot \sin(\arctg T_1 \cdot \omega - \arctg T_2 \cdot \omega). \end{aligned} \quad (35)$$

Из полученного выражения видно, что при поддержании на заданном уровне модуля вектора тока статора  $|\dot{I}_1|$  момент АД будет наибольшим, если будет обеспечено наибольшее значение произведения

$$F(\omega) = A(\omega) \cdot \sin \varphi_0(\omega). \quad (36)$$

При изменении частоты  $\omega$ , регулируемым параметром, входящим в данное выражение и определяющим величину электромагнитного момента, является скольжение  $S_\alpha$ .

Проведенный анализ показал, что при изменении частоты в пределах одной декады (от номинального значения  $\omega = \omega_{1H}$  до  $\omega = 0.1 \omega_{1H}$ ) функция  $F(\omega)$  имеет примерно одинаковое экстремальное значение при значении угла  $\varphi_0$  близком к  $45^\circ$ .

Таким образом, установлено, что при изменении в широком диапазоне значений относительного скольжения  $S_\alpha$ , оптимальный угол  $\varphi_0$ , обеспечивающий наибольшее значение электромагнитного момента асинхронного двигателя, близок к значению  $45^\circ$ .

В настоящее время разработан ряд систем векторного частотного управления асинхронным двигателем [2,3], обеспечивающих режим энергосбережения за счет стабилизации взаимного положения векторов тока статора и тока намагничивания. Дальнейшее совершенствование систем векторного частотного электропривода может осуществляться за счет оптимизации алгоритмов расчета и упрощения вычислительных процедур при косвенном определении параметров электропривода в элементах микропроцессорных систем управления.

#### Литература

- 1 Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением [Текст]. Л.: Энергоатомиздат, Ленинг. отд., 1992.- 296 с.
2. Патент РФ № 2132110. Способ оптимального векторного управления асинхронным электродвигателем и электропривод для осуществления этого способа [Текст] // Мищенко В.А., Мищенко Н.И., Мищенко А.В. МКИ H02P 21/00. Оpubл. 25.03.1998. Бюл.№6.
3. Патент № 2254666. Электропривод переменного тока [Текст] // П.Н.Левин, В.Н.Мещеряков. МКИ H02P 7 / 42. Оpubл. 20.06.2005. Бюл.№17.
4. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. [Текст] СПб: Энергоатомиздат. СПб отд., 1994. 496 с.