

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ В ТРУБОПРОВОДНЫХ СЕТЯХ В УСЛОВИЯХ АСУ ТП**

Существенное значение в системе водоснабжения имеют как активные, так и пассивные регулирующие органы (АРО и ПРО). К первым относятся насосные агрегаты, основным элементом которых являются электрические двигатели. Ко вторым относятся запорно-регулирующая аппаратура различных типов. В сетевых трубопроводных сетях водоснабжения при наличии автоматизированных систем управления распределением целевых продуктов рекомендуется применение электрифицированных задвижек, то есть задвижек с электрическим приводом. Учитывая АСУ электропривода (АСУ ЭП) в этом ПРО используется электродвигатель трёхфазного переменного тока.

Управление электродвигателями переменного тока осложнено рядом обстоятельств, наиболее существенными из которых являются следующие: 1) момент электродвигателя определяется произведением двух результирующих векторов электромагнитных параметров статора и ротора и является функцией четырёх переменных; 2) имеется сильное взаимодействие намагничивающих сил статора и ротора, взаимное состояние которых непрерывно меняется при вращении ротора; 3) с целью лучшего использования двигателя в различных режимах его работы возникает задача регулирования магнитного потока двигателя.

Электродвигатели переменного тока совместно с управляемыми преобразователями представляют собой сложные многосвязные нелинейные объекты управления. Полное математическое описание таких объектов оказывается довольно громоздким и непреминимым для инженерных методов синтеза систем управления. Вместе с тем в практике построения систем электроприводов, включая и АСУ ЭП переменного тока, получили распространение простые приёмы синтеза систем управления, основанные на принципах подчинённого управления и на использовании унифицированных настроек контуров регулирования,

входящих в систему управления. Использование этих приемов позволяет не только просто выполнить синтез систем управления, но и создает обоснованную возможность пренебрежения взаимосвязью ряда координат и параметров электроприводов.

Основная сложность при создании АСУ ЭП переменного тока заключается в создании независимого управления электромагнитным моментом и потоком двигателя. Если это удастся выполнить, то АСУ ЭП переменного тока с обратными связями по скорости или по положению выполняются точно так же, как и АСУ ЭП постоянного тока, включая и способы управления пусковыми и тормозными режимами.

При синтезе взаимосвязанных систем управления используются два основных приема, обеспечивающих автономность (независимость) контуров регулирования: а) использование различного рода дополнительных компенсационных связей между локальными контурами регулирования; б) разделение локальных контуров регулирования по быстродействию. Оба этих приема используются при выполнении АСУ ЭП переменного тока, и это дает основание уже на стадии формирования математической модели электропривода делать ряд упрощений.

Принимая во внимание изложенное выше, в качестве методической основы математического описания динамических процессов в электроприводах переменного тока использованы подходы, разработанные в трудах проф. Р. Шенфельда [1; 2]. Исследование электроприводов переменного тока в статических режимах обстоятельно выполнено в трудах проф. А. С. Сандлера [3; 4].

При исследовании переходных процессов в трёхфазных асинхронных электродвигателях целесообразно принять следующие допущения, позволяющие в доступной математической форме выразить соотношения основных параметров и координат электродвигателя: 1) намагничивающие силы обмоток двигателя распределены синусоидально вдоль окружности воздушного зазора; 2) потери в стали статора и ротора отсутствуют; 3) обмоток статора и ротора строго симметричны со сдвигом осей обмоток на  $120^\circ$ ; 4) насыщение магнитной цепи отсутствует.

Уравнение равновесия напряжений для обмоток трёх фаз статора имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{1a} &= i_{1a} R_1 + \frac{d\varphi_{1a}}{dt}; \\ u_{1b} &= i_{1b} R_1 + \frac{d\varphi_{1b}}{dt}; \\ u_{1c} &= i_{1c} R_1 + \frac{d\varphi_{1c}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

соответственно для обмоток трёх фаз ротора

$$\left. \begin{aligned} u_{2a} &= i_{2a} R_2 + \frac{d\varphi_{2a}}{dt}; \\ u_{2b} &= i_{2b} R_2 + \frac{d\varphi_{2b}}{dt}; \\ u_{2c} &= i_{2c} R_2 + \frac{d\varphi_{2c}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $u_{1a}, u_{1b}, u_{1c}, u_{2a}, u_{2b}, u_{2c}$  — мгновенные значения фазных напряжений статора и ротора;  $i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}, i_{2a}, i_{2b}, i_{2c}$  — мгновенные значения фазных токов статора и ротора;  $\varphi_{1a}, \varphi_{1b}, \varphi_{1c}, \varphi_{2a}, \varphi_{2b}, \varphi_{2c}$  — полные потокосцепления фазных обмоток;  $R_1, R_2$  — активные сопротивления обмоток статора и ротора.

Используя выражения результирующих векторов, уравнения (1) можно записать в виде одного дифференциального уравнения в векторной форме. Для этого первое уравнение из (1) умножается на  $\frac{2}{3}a^0$ , второе на  $\frac{2}{3}a$ , третье на  $\frac{2}{3}a^2$ . Суммируя полученные произведения, будем иметь:

$$\frac{2}{3}(u_{1a} + au_{1b} + a^2u_{1c}) = \frac{2}{3}(i_{1a} + ai_{1b} + a^2i_{1c})R_1 + \frac{2}{3}\frac{d}{dt}(\varphi_{1a} + a\varphi_{1b} + a^2\varphi_{1c})$$

или в векторной форме

$$u_1 = i_1 R_1 + \frac{d\varphi_1}{dt}. \quad (3)$$

Аналогично векторное уравнение напряжений ротора:

$$u_2' = i_2' R_2' + \frac{d\phi_2}{dt}. \quad (4)$$

В уравнениях (3) и (4) векторы записаны соответственно в системах координат статора и ротора. Для совместного решения уравнений их необходимо привести к одной системе координат.

При исследовании переходных процессов в электродвигателях переменного тока применяют различные ортогональные системы координат, отличающиеся угловой скоростью вращения координатных осей  $\omega_k$ , например системы, оси которых неподвижны относительно ротора, или неподвижны относительно статора, или вращаются с синхронной скоростью.

Уравнения асинхронного электродвигателя в системе координат, вращающейся с произвольной скоростью  $\omega_k$ , имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 R_1 + \frac{d\phi_1}{dt} + j\omega_k \phi_1; \\ u_2 &= i_2' R_2' + \frac{d\phi_2}{dt} + j(\omega_k - p_n \omega) \phi_2, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора;  $p_n$  — число пар полюсов.

При исследовании переходных процессов в асинхронном электродвигателе, управляемом частотой и напряжением статора, удобно использовать систему координат, вращающуюся со скоростью  $\omega_k$ , равной угловой скорости вращения магнитного поля  $\omega'_k$ , приведённой к числу пар полюсов, равному единице (приведённой к двухполюсному электродвигателю). Предполагается при этом справедливое равенство

$$\omega_0 = \omega_1 = 2\pi f_1,$$

где  $f_1$  — частота напряжения статора, Гц;  $\omega_1$  — угловая частота напряжения статора, рад/с.

На основании уравнений (5) для рассматриваемой координатной системы можно записать

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 R_1 + \frac{d\phi_1}{dt} + j\omega_k \phi_1; \\ u_2 &= i_2' R_2' + \frac{d\phi_2}{dt} + js\omega_1 \phi_2, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $s$  — скольжение электродвигателя:

где  $s$  — скольжение электродвигателя:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_1 - p_{\Pi} \omega}{\omega_1}$$

( $\omega_0 = \omega_0' / p_{\Pi}$  — угловая скорость вращения магнитного поля, или синхронная скорость электродвигателя).

Потокоцепления связаны с точками через индуктивности

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= i_1 L_1 + i_2' L_m; \\ \Phi_2 &= i_1 L_m + i_2' L_2. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Для определения электромагнитного момента асинхронного электродвигателя используется векторное произведение  $\Phi_1$  и  $i_1$ , тогда:

$$M = \frac{3}{2} p_{\Pi} (\Phi_1 \times i_1), \quad (8)$$

или векторное произведение  $\Phi_2$  и  $i_2'$ , тогда:

$$M = -\frac{3}{2} p_{\Pi} (\Phi_2 \times i_2'). \quad (9)$$

Учитывая выражения (7), можно записать (8) и (9) в виде:

$$M = \frac{3}{2} p_{\Pi} (i_1 L_1 + i_2' L_m) \times i_1 = \frac{3}{2} p_{\Pi} L_m (i_2' \times i_1); \quad (10)$$

$$M = -\frac{3}{2} p_{\Pi} (i_1 L_m + i_2' L_2) \times i_2' = -\frac{3}{2} p_{\Pi} L_m (i_1 \times i_2'); \quad (11)$$

Вторые равенства в уравнениях (10), (11) справедливы потому, что векторное произведение двух одинаково направленных векторов равно нулю.

Для полного описания переходных процессов в асинхронном электродвигателе к уравнениям напряжений и моментов следует добавить уравнение:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (12)$$

записанное для скалярных значений моментов  $M$  и  $M_c$ .

Полученная система уравнений электродвигателя является нелинейной, и решение её для различных динамических режимов работы электродвигателя может быть выполнено с использованием вычисли-

тельных машин. Вместе с тем при синтезе систем управления асинхронным двигателем целесообразно располагать простыми и наглядными динамическими моделями электродвигателя в виде передаточных функций или структурных схем. Такая возможность появляется, если рассматривать переходные процессы в отклонениях относительно начальных координат электродвигателя.

### Использованная литература

1. *Schönfeld R.* Das Signalfußbild das Asynchronmaschiene. — Messen, steuern, regeln, 1965, Н. 4. — S. 122—128.
2. *Die Technik der elektrischen Antriebe.* Grundlagen. — Berlin: VEB Verlag Technik, 1976. — 598 S.
3. *Сандлер А. С., Тарасенко Л. М.* Динамика каскадных асинхронных электроприводов. — М.: Энергия, 1977. — 200 с.
4. *Сандлер А. С., Сарбатов Р. С.* Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. — М.: Энергия, 1974. — 328 с.