

УДК 677.052-185

**АНАЛИЗ ДИНАМИКИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ПРИЕМНОГО ВАЛА РОВНИЧНОЙ МАШИНЫ**

И.Н.СЕРЯКОВ, А.В.ШИЛОВ, П.В.МАТВЕЕВ, К.А.ПОЛЯКОВ, А.Е. ПОЛЯКОВ

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н.Косыгина)

Асинхронный двигатель (АД) представляет собой нелинейный объект, описываемый системой нелинейных дифференциальных уравнений. При тиристорном управлении эти трудности усугубляются тем, что двигатель питается несинусоидальным прерывистым напряжением, также связанным нелинейной зависимостью с углом открытия тиристорov (α). Указанные факторы существенно усложняют аналитические исследования АД в замкнутых системах управления.

Эта задача может быть решена при изучении динамических качеств систем с АД в области малых отклонений координат от равновесного, установившегося состояния, что позволяет линеаризовать уравнения, характеризующие положение системы. При исследованиях в "малом" можно считать, что механическая характеристика двигателя описывается упрощенной формулой Клосса, при этом учитывается только изменение первой гармоники питающего напряжения и не принимаются

в расчет электромагнитные переходные процессы в АД. При всех указанных допущениях и упрощениях изучение динамических свойств замкнутых систем управления в "малом" является характерным для замкнутых систем, поддерживающих или стабилизирующих какой-либо параметр, в частности, частоту вращения двигателя при изменении возмущающих воздействий (ΔM_{ст}), или отрабатывающих небольшие приращения управляющих параметров (ΔU_{ср}).

Упрощенные передаточные функции системы автоматического регулирования частоты вращения АД в зонах малых отклонений при приращениях управляющего сигнала ΔU_{ср} и момента статистической нагрузки ΔM_{ст} приведены в работе [1].

Согласно формуле Клосса момент двигателя представлен следующим выражением:

$$M = f(n_2, v_1) = [2M_K n_1 s_K (n_1 - n_2) v_1^2] / [(n_1 - n_2)^2 + n_1^2 s_K^2], \quad (1)$$

где M_K – момент критический; s_K – скольжение критическое; n₂ – частота вращения ротора; n₁ – синхронная частота вращения; v₁ – относительное значение первой гармоники питающего напряжения.

Линеаризуем (1) путем разложения в ряд Тейлора в окрестности установившегося значения момента M₀:

$$M = M_0 + \left(\frac{\partial M}{\partial n_2} \right)_{n_2 = n_0} v_1 = v_{10} \Delta n_2 + \left(\frac{\partial M}{\partial n_2} \right)_{n_2 = n_0} v_1 = v_{10} \Delta v_2,$$

где $k_\beta = \partial M / \partial n_2$ – коэффициент жесткости механических характеристик двигателя или коэффициент самовыравнивания; $k_\gamma = \partial M / \partial v_1$ – коэффициент чувствительности по моменту к изменению первой гармоники напряжения; M_0 – момент, образуемый первой гармоникой питающего напряжения; M_0 – момент, образуемый первой гармоникой питающего напряжения.

Согласно (1):

$$k_\beta = \frac{v_1^2 \left\{ 2M_k n_1 s_k [n_1 - n_2]^2 - (n_1 - n_k)^2 \right\}}{(n_1 - n_2)^2 + n_1^2 s_k^2},$$

где n_k – частота вращения двигателя, соответствующая критическому скольжению;

$$K_\gamma = \frac{v_1 [4M_k n_1 s_k (n_1 - n_2)]}{(n_1 - n_2)^2 + n_1^2 s_k^2}.$$

Уравнение движения электропривода приобретает следующий вид:

$$M_0 + k_\beta \Delta n + k_\gamma \Delta v_1 - M_{ст} = (GD^2/375)(\Delta n_2 / \Delta t). \quad (2)$$

В установившемся режиме момент двигателя должен быть равен моменту статической нагрузки и, если рассматривать отклонение от положения равновесия не за счет изменения статического момента, то есть принять, что $\Delta M_{ст} = 0$, то можно воспользоваться уравнением статики:

$$M_0 - M_{ст0} = 0,$$

где $M_{ст0}$ – начальный момент статического сопротивления.

Тогда (2) можно записать в следующей форме:

$$k_\beta \Delta n + k_\gamma \Delta v_1 - M_{ст} = (GD^2/375)(\Delta n_2 / \Delta t),$$

откуда можно получить передаточную функцию АД при изменениях v_1 :

$$W(p) = \Delta n_2 / \Delta v_1 = k_d / (T_1 p \pm 1), \quad (3)$$

где $k_d = k_\gamma / |k_\beta|$; $T_1 = GD^2 / (375 |k_\beta|)$; $p = d/dt$ – оператор дифференцирования. Знак "+" в знаменателе (3) относится к случаю, когда $k_\beta < 0$; если $k_\beta > 0$, необходимо ставить знак "-".

Из (3) видно, что АД представляет собой апериодическое звено, динамические качества которого зависят от $\text{sign } k_\beta$; при $n_2 < n_k$, $k_\beta > 0$ двигатель имеет положительный коэффициент жесткости и представляет собой апериодическое неустойчивое звено первого порядка. Вывод этот указывает на то, что при $M_{ст} = \text{const}$ нельзя обеспечить устойчивой работы АД в разомкнутых системах при скольжениях, больших s_k . Если $n_2 > n_k$, $k_\beta < 0$, в этом случае двигатель является устойчивым апериодическим звеном.

Полученная передаточная функция АД позволяет рассмотреть его свойства в замкнутых системах, то есть при плавном регулировании частоты вращения. Структурная схема такой системы представлена на рис.1. Положительному приращению $\Delta U_{ср}$ соответствует положительное приращение рассогласования $\Delta \varepsilon = \Delta U_{ср} - \Delta U_{дч}$, где $\Delta U_{дч}$ – приращение напряжения датчика частоты вращения. Знак минус перед коэффициентами усиления k_γ и k_2 означает разные знаки приращений входных и выходных параметров.

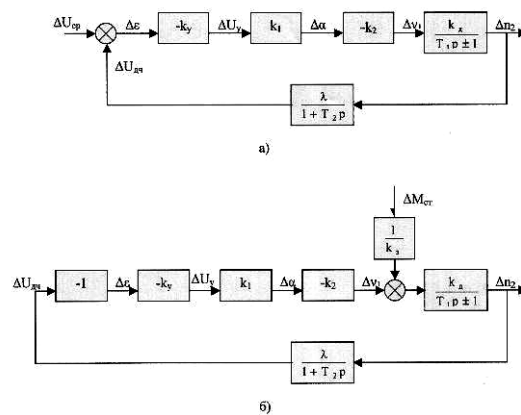


Рис. 1

На структурных схемах рис.1 (структурная схема асинхронного электропривода в замкнутой системе: а – при изменении управляющего воздействия U_{cp} ; б – при изменении возмущающего воздействия $M_{ст}$) показано, что обратная связь по частоте вращения вводится в систему при использовании апериодического, а не усилительного звена, что имеет место в реальных электроприводах, где кривая выходного напряжения датчика частоты вращения сглаживается и фильтруется.

Запишем в приращениях уравнения, характеризующие взаимосвязь отдельных звеньев, входящих в замкнутую систему

$$W(p) = \Delta n / \Delta U_{cp} = [k_1 k_2 k_y k_d (1 + T_2 p)] / [T_1 T_2 p^2 + (T_1 \pm T_2) p + (k_1 k_2 k_y k_d \lambda \pm 1)]. \quad (5)$$

Коэффициенты $k_1, k_y, k_\beta, k_\alpha, \lambda$, входящие в уравнение (5), определены из [3]. Величину k_2 рекомендуется определять при использовании семейства кривых $v_1 = f(\alpha, \varphi)$:

$$k_2 = \left(\frac{\partial v_1}{\partial \alpha} \right)_{\varphi = \varphi_0} \alpha = \alpha_0.$$

При небольших изменениях частоты вращения можно считать фазовый угол нагрузки неизменным ($\varphi = \text{const}$) и определить k_2 по кривой $v_1 = f(\alpha)$ путем графического дифференцирования в окрестности точки $\alpha = \alpha_0$.

Если обратная связь по частоте вращения вводится с помощью пропорционального звена, то $T_2 = 0$ и передаточная функция (5) приобретает следующий вид:

$$W(p) = \Delta n_2 / \Delta U_{cp} = [k_1 k_2 k_y k_d] / [T_1 p + (k_1 k_2 k_y k_d \lambda \pm 1)],$$

то есть двигатель в этом случае представляет собой устойчивое апериодическое звено, если $k_1 k_2 k_y k_d > 1$, это условие практически всегда выполняется.

Для изучения переходных процессов, вызванных изменением $\Delta M_{ст}$, необходимо

регулировать частоту вращения при изменении управляющего воздействия на величину ΔU_{cp} [2]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon &= \Delta U_{cp} - \Delta U_{дч}; \\ \Delta U_y &= -k_y \Delta \varepsilon; \\ \Delta \alpha &= k_1 \Delta U_y; \\ \Delta v_1 &= -k_2 \Delta \alpha; \\ k_d \Delta v_1 &= (T_1 p \pm 1) \Delta n_2; \\ \Delta U_{дч} &= \lambda \Delta n_2 / (1 + T_2 p). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Используя систему уравнений (4), получим передаточную функцию АД в динамических режимах:

записать передаточную функцию системы по возмущающему воздействию, когда происходит приращение момента на $\Delta M_{ст}$ при неизменном U_{cp} , то есть при $\Delta U_{cp} = 0$. Система уравнений, записанная в приращениях координат для структурной схемы, показанной на рис.1, приобретает следующий вид [4]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon &= \Delta U_{дч}; \\ \Delta U_y &= -k_y \Delta \varepsilon; \\ \Delta \alpha &= k_1 \Delta U_y; \\ \Delta v_1 &= -k_2 \Delta \alpha; \\ k_d \Delta v_1 - \Delta M_{ст} / k_\beta &= (T_1 p \pm 1) \Delta n_2; \\ \Delta U_{дч} &= \lambda \Delta n_2 / (1 + T_2 p). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Из уравнений системы (6) может быть получена передаточная функция системы

$$W(p) = \Delta n / \Delta M_{ст} = [-k_d (1 + T_2 p)] / \{k_\beta [T_1 T_2 p^2 + (T_1 \pm T_2) p + (k_1 k_2 k_y k_d \lambda \pm 1)].\}$$

Ряд коэффициентов k_β, k_α, k_2 , входящих в передаточную функцию, не являются постоянными величинами, а изменяются в зависимости от выбранной точки равновесного состояния системы, что требует их вычисления для каждого отдельного случая.

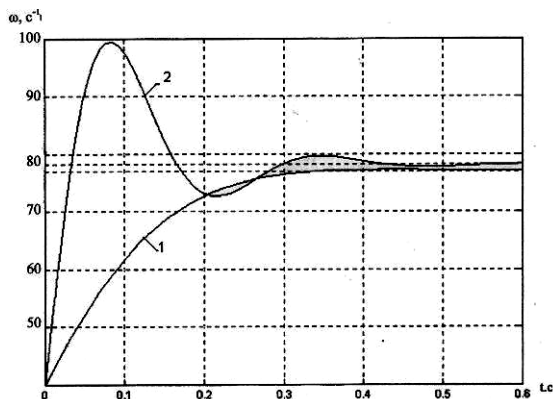


Рис. 2

Для иллюстрации на рис.2 приведены кривые изменения частоты вращения в функции времени при изменении управляющего воздействия $U_{cp}=\text{var}$; ($\Delta U_{cp}=\text{var}$; $\Delta U_{cp}=0,3\text{ В}$); 1 – $k_y = 6$, $T_2 = 0,05$; 2 – $k_y = 30$, $T_2 = 0,05$. На рис.3 – при изменении возмущающего воздействия $M_{ст}=\text{var}$ для разных значений k_y и T_2 ($\Delta U_{cp}=0,05\text{ кгс}\cdot\text{м}$). 1 – $k_y = 6$, $T_2 = 0,05$; 2 – $k_y = 30$, $T_2 = 0,05$. Кривые отражают процесс регулирования частоты вращения двигателя, обмотки статора которого соединены в звезду без нулевого провода. Точка равновесного состояния соответствует частоте вращения $\omega_2=31,4\text{ с}^{-1}$, работа АД при этом характеризуется следующими параметрами: $M_{ст}=1,12\text{ кгс}\cdot\text{м}$; $U_{cp} = 7,9\text{ В}$; $k_1=12,7\text{ эл.град/В}$; $k_2=0,003\text{ 1/эл.град}$; $\lambda=0,013\text{ В/мин}^{-1}$; $T_1=3,65\text{ с}$; $k_3=4,88\text{ кгс}\cdot\text{м}$; $k_\beta=0,0006\text{ Кгс/мин}^{-1}$. Выбранные коэффициенты усиления системы и постоянные времени имеют следующие значения: $k_y=6\div 30$; $T_2=0,01\text{ с}, 0,05\text{ с}$.

ВЫВОДЫ

Рассматриваемая статическая система автоматического регулирования обеспечивает при соответствующем выборе k_y , T_2 удовлетворительное качество процесса регулирования, в частности, необходимый

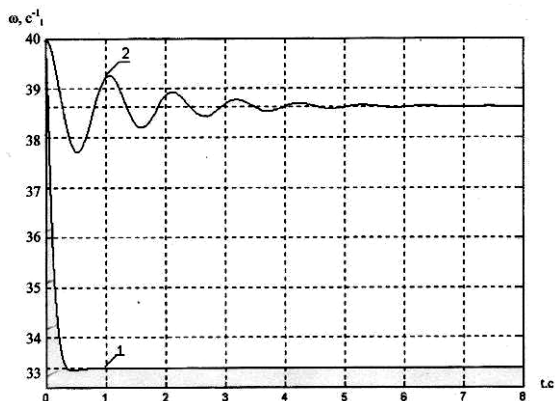


Рис. 3

запас устойчивости, желаемый динамический провал частоты вращения при набросе момента и минимальное время регулирования.

Специальные режимы АД, реализуемые в замкнутой системе с обратной связью по частоте вращения, обусловлены ступенчатыми и значительными по величине изменениями ΔU_{cp} , $\Delta M_{ст}$. Указанные режимы соответствуют пуску и естественному торможению привода приемного вала равнинной машины при различных диаметрах наматывания волокнистого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В.А. Электромеханические переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1984.
2. Чистов В.П. Оптимальное управление электрическими приводами. – М.: Энергия, 1977.
3. Загорский А.Е. Повышение эффективности эксплуатации асинхронных двигателей // Тез. докл. научн. сем.: Проблемы энергосбережения в проектировании новых видов приводов. – М., 1986.
4. Радина Е.В. Алгоритмы регулирования напряжения асинхронных двигателей // Электротехника. – 1993, №5. С.32...35.

Рекомендована кафедрой электротехники. Поступила 01.02.08.