

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Шавазов Абдулатиф Ачилович

Доктор философии по техническим наукам (PhD), Начальник лаборатории, НИИ Проблем Энергетики, Академия Наук Республики Узбекистан, ул. Ч. Айтматова дом-2, г. Ташкент 100084, Республика Узбекистан

Ишанова Дилдора Абдувалиевна

Старший преподаватель, Ташкентский Государственный Технический Университет им. Ислама Каримова, ул. Университетская, дом-2, г. Ташкент, 100095, Республика Узбекистан

**Аннотация**

Произведен анализ устойчивости и динамических характеристик систем электропривода с асинхронным двигателем при автоматическом частотном управлении. Рассмотрена работа асинхронного двигателя в системе частотного управления с заданным законом регулирования напряжения в функции частоты и нагрузки.

**Ключевые слова:** математическая модель, структурная схема автоматизированного электропривода электропривод, асинхронный двигатель, частотно-регулируемый электропривод, системы автоматического управления, устойчивость, динамические характеристики электропривода, структурная схема автоматизированных электроприводов, передаточные функции электроприводов.

Анализ устойчивости и динамических характеристик систем электроприводов с асинхронными двигателями (АД) при автоматическом частотном управлении скорости вращения может производиться на основе метода структурных схем и передаточных функций, которые получили широкие применения в теории и практике систем автоматического регулирования и управления. Представление систем автоматизированных электроприводов в виде структурных схем дает возможность характеризовать их с точки зрения некоторых общих свойств, присущих определенными классу систем автоматического управления (структурно устойчивые и неустойчивые системы, много контурные и много связанные системы и т.п.).

Поведение АД в системе частотно-управляемого электропривода определяется взаимным изменением трех групп связанных между собой величин - входными (частота, напряжение), внутренними (токи статора и ротора, поток) и выходными (скорость вращения, момент на валу). Изменение момента нагрузки оказывает возмущающее воздействие на систему, а изменение скорости вращения характеризует регулировочные свойства системы.

В соответствии с вышесказанным рассмотрим, без учета электромагнитных процессов и при малых отклонениях от какого-либо установившегося режима, математические модели и на их основе структурные схемы, а также передаточные функции АД как объекта системы с частотным управлением.

Будем исходить из следующего уравнения равновесия моментов (уравнения движения) двигателя

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где  $M$  - развиваемый двигателем вращающий электромагнитный момент;  $M_c$  - момент сопротивления на валу двигателя;  $J$  - момент инерции вращающихся механических частей двигателя и рабочего механизма, приведенный к валу двигателя;  $\omega$  - угловая скорость вращения ротора двигателя, которая связана с относительной частотой управления ( $F = f / f_n$ ) и параметром абсолютного скольжения ( $\beta = FS$ ) двигателя соотношением:

$$\omega = \omega_{1n}(F - \beta), \quad (2)$$

$f$  и  $f_n$  - текущая и номинальная частоты управления,  $S$  - относительное скольжение АД,  $\omega_{1n}$  - угловая скорость вращения поля статора при номинальном частоте управления.

Электромагнитный момент АД определим из следующего уравнения механической характеристики при переменной частоте управления [1]

$$M = \left( \frac{\gamma}{F} \right)^2 a \frac{r_2' x_{\mu n}^2}{\beta D^2}, \quad (3)$$

где  $\gamma = U / U_n$  - относительное напряжение,  $U$  и  $U_n$  - текущее и номинальное напряжения;  $a = mpU_n^2 / 19,62\pi f_n$  - постоянная величина,  $m$  - число фаз,  $p$  - число пар полюсов;

$$D = \sqrt{\left( \frac{r_1 r_2'}{F\beta} - x_s x_r \sigma \right)^2 + \left( \frac{r_2'}{\beta} x_s + \frac{r_1}{F} x_r \right)^2}$$

$x_s = x_{1n} + x_{\mu n}$ ,  $x_r = x_{2n} + x_{\mu n}$ ,  $\sigma = 1 - x_{\mu n}^2 / x_s x_r$ ,  $r_1$  и  $x_{1n}$  - активное и номинальное индуктивное сопротивления фазной обмотки статора,  $r_2'$  и  $x_{2n}'$  - приведенные к статору активное и номинальное индуктивное сопротивления фазной обмотки ротора,  $x_{\mu n}$  - номинальное индуктивное сопротивление намагничивающего контура АД.

Рассматривая переменные величины, входящие в (1), (2) и (3), в приращениях относительно их начальных значений получим уравнения динамического режима работы АД, связывающие приращения переменных параметров:

$$\Delta M - \Delta M_c = Jp\Delta\omega, \quad (4)$$

$$\Delta\omega = k_F\Delta F - k_\beta\Delta\beta, \quad (5)$$

$$\Delta M = \mu_\gamma\Delta\gamma - \mu_F\Delta F + \mu_\beta\Delta\beta, \quad (6)$$

где коэффициенты линеаризации равны:  $k_F = k_\beta = \omega_{1n}$ ,  $p = d / dt$ ,

$$\mu_\gamma = \frac{\partial \mu}{\partial \gamma} = 2ar_2' x_{\mu n}^2 \gamma_o / F_o^2 \beta_o D_o^2,$$

$$\mu_F = \frac{\partial M}{\partial F} = -\frac{2ar_2'x_{\mu}^2\gamma_o^2}{\beta_o F_o^3 D_o^4} \left[ \frac{r_1 r_2' x_{\mu}^2}{F_o \beta_o} + \left( \frac{r_2' x_s}{\beta_o} \right)^2 + (x_s x_r \sigma)^2 \right],$$

$$\mu_\beta = \frac{\partial M}{\partial \beta} = \frac{2ar_2'x_{\mu}^2\gamma_o^2}{\beta_o F_o^3 D_o^4} \left\{ \frac{r_2'}{\beta_o} \left[ \left( \frac{r_1}{F_o} \right)^2 + x_s^2 \right] + \frac{r_1}{F_o} x_{\mu}^2 \right\},$$

$$D_o = \sqrt{\left( \frac{r_1 r_2'}{F_o \beta_o} - x_s x_r \sigma \right)^2 + \left( \frac{r_2'}{\beta_o} x_s + \frac{r_1}{F_o} x_r \right)^2}.$$

Индексом "0" обозначены начальные значения переменных параметров.

Рассмотрим два варианта совместного решения уравнения (4)-(6). В первом варианте считали, что выходным параметром двигателя является угловая скорость вращения двигателя. Во втором варианте за выходной параметр принимаем параметры абсолютного скольжения двигателя. В результате получим, соответственно, следующие два уравнения

$$k_1 \Delta F + k_2 \Delta \gamma - k_3 \Delta M_c = (T_1 p + 1) \Delta \omega, \quad (7)$$

$$k_1' (T_2 p + 1) \Delta F + k_2' \Delta \gamma - k_3' \Delta M_c = (T_1 p + 1) \Delta \beta, \quad (8)$$

где обозначены:  $T_1 = Jk_\beta / \mu_\beta$  - механическая постоянная времени АД,  $T_2 = Jk_F / \mu_F$  - механическая постоянная времени двигателя по каналу частоты управления,  $k_1 = \mu_\beta - \mu_F$ ,  $k_2 = \mu_\gamma$ ,  $k_3 = 1$ ,  $k_1' = \mu_F / \mu_\beta$ ,  $k_2' = -\mu_\gamma / \mu_\beta$ ,  $k_3' = -1 / \mu_\beta$ .

В соответствии с принципами частотного управления каждая структурная схема имеет два управляющих воздействия, осуществляемых по каналам управления частотой и напряжением, и одно возмущающее воздействие в виде приращения момента сопротивления на валу.

Наличие в каждой полученных структурных схемах двух управляющих воздействий не позволяет получить передаточную функцию АД в общем виде. Для приведения схем к одному управляющему воздействию необходимо рассмотреть работу АД в системе частотного управления с заданным законом управления напряжения в функции частоты и нагрузки. При этом для регулирования необходимого соотношения между напряжением и частотой в общем случае можно принимать за исходный управляющий параметр как частоту, так и напряжение. С точки зрения влияния возмущений в питающей сети и нагрузки на скорость АД более рациональной будет система, у которой исходным параметром является частота, а напряжение регулируется в функции частоты и нагрузки двигателя. В такой системе динамические изменение скорости будет меньше, так как скорость зависит в первую очередь от частоты управления. По этой причине частоту управления считаем исходным параметром.

Рациональное соотношение между напряжением, частотой управления и момента сопротивления на валу АД определяется следующей зависимостью [2]

$$\gamma = F \sqrt{\frac{M_c}{M_{ch}}}, \quad (9)$$

которое в приращениях запишем в виде

$$\Delta\gamma = k_4\Delta F + k_5\Delta M_c, \quad (10)$$

$$\text{где } k_4 = \sqrt{\frac{M_{co}}{M_{cn}}}, \quad k_5 = \frac{F_o M_{co}}{\sqrt{M_{co} M_{cn}}}.$$

При произвольном изменении момента сопротивления структурные схемы согласно уравнению (10) преобразуются и каждый из этих схем имеет одно входное управляющие воздействие. Они позволяют определить передаточные функции АД как по управляющим, так и возмущающим воздействиям. Следует отметить, что в этих структурных схемах момент сопротивления воздействует по двум каналам. Как известно, системы с такими структурными схемами относятся к классу инвариантных систем.

При управлении напряжением в функции частоты и нагрузки передаточные функции АД по управляющим и возмущающим воздействиям согласно (7) и (10) соответственно будет:

$$W_y(p) = \frac{k_1 + k_2 k_4}{T_1 p + 1}, \quad W_e(p) = -\frac{k_3 - k_2 k_5}{T_1(p) + 1}. \quad (11)$$

Аналогично найдем:

$$W_y(p) = \frac{(T_2 p + 1)k_1' + k_2' k_4}{T_1 p + 1}, \quad W_e(p) = -\frac{k_3' - k_2' k_5}{T_1 p + 1}. \quad (12)$$

При  $M_c = M_{cn} = const$ , т.е. когда согласно (10) приращение напряжения изменяется пропорционально частоте. При этом между каналами частоты и напряжения появляются прямые связи.

Системы частотного управления АД, работающие по принципу регулирования напряжения пропорционально частоте управления, нашли широкое практическое применение из-за простоты реализации. Этот принцип управления пригоден не только для механизмов с постоянными моментами сопротивления, но и для механизмов с моментами сопротивления, изменяющегося в функции скорости по вентиляторному закону. Недостатком являются некоторые ухудшения характеристики АД вследствие уменьшения потока из-за падения напряжения в активных сопротивлениях статора АД. В рассмотренном варианте управления напряжения передаточные функции АД по управляющим воздействиям (передаточные функции по возмущающим воздействиям равны нулю, так как  $M_c = const$ ) согласно (7), (8) и (10) будут

$$W_y(p) = \frac{k_1 + k_2}{T_1 p + 1}, \quad W_e(p) = -\frac{(T_2 p + 1)k_1' + k_2'}{T_1 p + 1}. \quad (13)$$

На основе полученных результатов можно делать следующие выводы:

Асинхронный двигатель как объект системы частотного управления может быть представлен обобщенной структурной схемой, на которую в общем случае воздействует два управляющих (частота, напряжение) и одно возмущающее (момент нагрузки) воздействия. Параметры элементарных звеньев схемы являются функцией частоты, напряжения и параметра абсолютного скольжения.

Наличие двух управляющих воздействий не позволяет написать передаточную функцию АД в общем виде. Чтобы привести обобщенную структурную схему к виду с одним входным воздействием необходимо рассмотреть работу АД в системе частотного управления с заданным законом регулирования напряжения в функции частоты и нагрузки.

В структурной схеме, построенной по принципу регулирования напряжения в функции частоты и нагрузки, момент нагрузки воздействует по двум каналам. Системы с такой структурой относятся к классу инвариантных систем.

#### Список использованной литературы

1. Мирзиёев Ш.М. Построим наше великое будущее вместе с нашим смелым и благородным народом. – Ташкент: “Ўзбекистон”, 2017. – С. 488.
2. Камалов Т.С. Частотно регулируемый электропривод насосных станций машинного орошения. – Т.: Фан, 2014. – С. 368.
3. Камалов Т.С., Тоиров О.З., Шавазов А.А. Математическая модель многосвязная система асинхронного электропривода с частотным управлением // Межд. научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности использования электрической энергии в отраслях агропромышленного комплекса» – Ташкент, 2015. С. 260-265.
4. Камалов Т.С., Шавазов А.А. Обобщенная математическая модели в системе насосный агрегат-трубопровод // Международной научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности использования электрической энергии в отраслях агропромышленного комплекса» – Ташкент, 2018. С. 660-663.
5. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. –М.: Машиностроение, 2013. – С. 176.