

рушающие канал. Обеспечивается равномерная загрузка фаз трехфазной электросети. Трансформаторный ввод тока в МГД-каналы позволяет избежать применения громоздких токопроводов электрического тока величиной порядка 10 килоампер. При использовании трехфазной системы электромагнитный напор МГД-насоса увеличивается в 2-3 раза в тех же габаритах. Имеет место удобный разогрев металлопровода перед подачей в него жидкого металла с температурой 8000С. Массгабаритные показатели насоса улучшаются в 2-3 раза. МГД-установка не требует для запуска вакуумной установки. Отсутствие обмоток в высокотемпературных зонах МГД-каналов позволяет использовать МГД-установку для перекачивания металлов с температурой 8000°С и выше.

**А.А. Емельянов, А.В. Клишин,
А.В. Медведев**

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В НЕПОДВИЖНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ С ПЕРЕМЕННЫМИ $\bar{\psi}_R - \bar{i}_S$

При выполнении студентами дипломных и курсовых работ, связанных с моделированием асинхронного двигателя, возникает необходимость увеличения вариантов их модификации. Одним из способов решения этой задачи является возможность выразить электромагнитный момент через различную комбинацию переменных токов и потокосцеплений двигателя [1, с.238] и [2]. Данная статья позволяет сформировать у студентов представление об одном из множества вариантов моделирования АД в «Matlab-Simulink». Вывод уравнений даем без сокращений, т.к. важен не только конечный результат, но и путь, ведущий к цели.

Основные уравнения математической модели АД, записанные в векторной форме в относительных единицах, имеют следующий вид [3]:

$$\begin{cases} \bar{u}_S = r_S \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\psi}_S}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot \bar{\psi}_S \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} 0 = r_R \cdot \bar{i}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j \cdot (\alpha_k - \nu \cdot p) \cdot \bar{\psi}_R \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \bar{\psi}_S = x_S \cdot \bar{i}_S + x_m \cdot \bar{i}_R \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \bar{\psi}_R = x_m \cdot \bar{i}_S + x_R \cdot \bar{i}_R \end{cases} \quad (4)$$

Определим электромагнитный момент через векторное произведение [1, с. 238]:

$$m = k_R \cdot (B \bar{\Psi}_R \cdot \bar{I}_S) = k_R \cdot (\psi_{R\beta} \cdot i_{S\alpha} - \psi_{R\alpha} \cdot i_{S\beta})$$

Из уравнения (4) выразим $\bar{i}_R$ тогда,

$$\bar{i}_R = \frac{1}{x_R} \cdot \bar{\psi}_R - \frac{x_m}{x_R} \cdot \bar{i}_S.$$

Подставим $\bar{i}_R$ в уравнение (3):

$$\bar{\psi}_S = x_S \cdot \bar{i}_S + x_m \cdot \left(\frac{1}{x_R} \cdot \bar{\psi}_R - \frac{x_m}{x_R} \cdot \bar{i}_S \right) = \left(x_S - \frac{x_m^2}{x_R} \right) \cdot \bar{i}_S + \frac{x_m}{x_R} \cdot \bar{\psi}_R.$$

Обозначим $x_S - \frac{x_m^2}{x_R} = x'_S$ и $\frac{x_m}{x_R} = k_R$, тогда

$$\bar{\psi}_S = x'_S \cdot \bar{i}_S + k_R \cdot \bar{\psi}_R.$$

В уравнении (2) исключим $\bar{i}_R$:

$$0 = r_R \cdot \left(\frac{1}{x_R} \cdot \bar{\psi}_R - \frac{x_m}{x_R} \cdot \bar{i}_S \right) + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j \cdot (\alpha_k - \nu \cdot p) \cdot \bar{\psi}_R,$$

$$0 = \frac{r_R}{x_R} \cdot \bar{\psi}_R - r_R \cdot \frac{x_m}{x_R} \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j \cdot (\alpha_k - \nu \cdot p) \cdot \bar{\psi}_R.$$

Обозначим $\frac{x_R}{r_R} = \bar{T}_R$, $\frac{x_m}{x_R} = k_R$, тогда

$$0 = \frac{1}{\bar{T}_R} \cdot \bar{\psi}_R - r_R \cdot k_R \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j \cdot (\alpha_k - \nu \cdot p) \cdot \bar{\psi}_R.$$

Из последнего уравнения выделим $\frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot \bar{\psi}_R$, которое в дальнейшем подставим в уравнение (1):

$$\frac{d\bar{\bar{\psi}}_R}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot \bar{\bar{\psi}}_R = -\frac{1}{T_R} \cdot \bar{\bar{\psi}}_R + r_R \cdot k_R \cdot \bar{i}_S + j \cdot v \cdot p \cdot \bar{\bar{\psi}}_R.$$

В уравнении (1) сделаем следующие преобразования:

$$\begin{aligned} \bar{u}_s &= \bar{i}_s \cdot r_s + \frac{d}{dt}(x'_s \cdot \bar{i}_s + k_R \cdot \bar{\bar{\psi}}_R) + j \cdot \alpha_k \cdot (x'_s \cdot \bar{i}_s + k_R \cdot \bar{\bar{\psi}}_R) = \bar{i}_s \cdot r_s + x'_s \cdot \frac{d\bar{i}_s}{dt} + \\ &+ k_R \cdot \frac{d\bar{\bar{\psi}}_R}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot x'_s \cdot \bar{i}_s + j \cdot \alpha_k \cdot k_R \cdot \bar{\bar{\psi}}_R = \bar{i}_s \cdot r_s + x'_s \cdot \frac{d\bar{i}_s}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot x'_s \cdot \bar{i}_s + \\ &+ k_R \cdot \left(\frac{d\bar{\bar{\psi}}_R}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot \bar{\bar{\psi}}_R \right) = \bar{i}_s \cdot r_s + x'_s \cdot \frac{d\bar{i}_s}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot x'_s \cdot \bar{i}_s - \frac{k_R}{T_R} \cdot \bar{\bar{\psi}}_R + r_R \cdot k_R^2 \cdot \bar{i}_s + \\ &+ j \cdot v \cdot p \cdot \bar{\bar{\psi}}_R \cdot k_R = (r_s + r_R \cdot k_R^2) \cdot \bar{i}_s + x'_s \cdot \frac{d\bar{i}_s}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot x'_s \cdot \bar{i}_s + \\ &+ j \cdot v \cdot p \cdot \bar{\bar{\psi}}_R \cdot k_R - \frac{k_R}{T_R} \cdot \bar{\bar{\psi}}_R. \end{aligned}$$

Обозначим $r_s + r_R \cdot k_R^2 = r$, тогда

$$\bar{u}_s = r \cdot \bar{i}_s + x'_s \cdot \frac{d\bar{i}_s}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot x'_s \cdot \bar{i}_s + j \cdot v \cdot p \cdot \bar{\bar{\psi}}_R \cdot k_R - \frac{k_R}{T_R} \cdot \bar{\bar{\psi}}_R.$$

Рассмотрим процессы в неподвижной системе координат $\omega_k = 0$, $\alpha_k = 0$:

$$\begin{cases} \bar{u}_s = r \cdot \bar{i}_s + x'_s \cdot \frac{d\bar{i}_s}{dt} + j \cdot v \cdot p \cdot \bar{\bar{\psi}}_R \cdot k_R - \frac{k_R}{T_R} \cdot \bar{\bar{\psi}}_R \\ 0 = \frac{1}{T_R} \cdot \bar{\bar{\psi}}_R - r_R \cdot k_R \cdot \bar{i}_s + \frac{d\bar{\bar{\psi}}_R}{dt} - j \cdot v \cdot p \cdot \bar{\bar{\psi}}_R. \end{cases}$$

Вещественную ось обозначим α , а мнимую через β . Пространственные векторы в этом случае раскладываются по осям: $\bar{u}_s = u_{S\alpha} + j \cdot u_{S\beta}$;

$$\bar{i}_s = i_{S\alpha} + j \cdot i_{S\beta}; \quad \bar{\bar{\psi}}_R = \psi_{R\alpha} + j \cdot \psi_{R\beta}.$$

Подставим эти значения в систему уравнений и, приравняв отдельно вещественные и мнимые части, получим:

$$\begin{cases} u_{S\alpha} + j \cdot u_{S\beta} = r \cdot (i_{S\alpha} + j \cdot i_{S\beta}) + x'_s \cdot \frac{d(i_{S\alpha} + j \cdot i_{S\beta})}{dt} + j \cdot v \cdot p \cdot (\psi_{R\alpha} + j \cdot \psi_{R\beta}) \cdot k_R - \\ - \frac{k_R}{T_R} \cdot (\psi_{R\alpha} + j \cdot \psi_{R\beta}) \\ 0 = \frac{(\psi_{R\alpha} + j \cdot \psi_{R\beta})}{T_R} - r_R \cdot k_R \cdot (i_{S\alpha} + j \cdot i_{S\beta}) + \frac{d(\psi_{R\alpha} + j \cdot \psi_{R\beta})}{dt} - \\ - j \cdot v \cdot p \cdot (\psi_{R\alpha} + j \cdot \psi_{R\beta}) \end{cases}$$

или по проекциям α и β :

$$\begin{cases} u_{S\alpha} = r \cdot i_{S\alpha} + x'_S \cdot \frac{di_{S\alpha}}{dt} - v \cdot p \cdot \psi_{R\beta} \cdot k_R - \frac{k_R}{T_R} \cdot \psi_{R\alpha} \\ u_{S\beta} = r \cdot i_{S\beta} + x'_S \cdot \frac{di_{S\beta}}{dt} + v \cdot p \cdot \psi_{R\alpha} \cdot k_R - \frac{k_R}{T_R} \cdot \psi_{R\beta} \\ 0 = \frac{1}{T_R} \cdot \psi_{R\alpha} - r_R \cdot k_R \cdot i_{S\alpha} + \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} + v \cdot p \cdot \psi_{R\beta} \\ 0 = \frac{1}{T_R} \cdot \psi_{R\beta} - r_R \cdot k_R \cdot i_{S\beta} + \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} - v \cdot p \cdot \psi_{R\alpha} \end{cases}$$

Окончательно, с учетом электромагнитных моментов система уравнений

АД в неподвижной системе координат в операторной форме ($\frac{d}{dt} = s$) запишется

в виде:

$$\begin{cases} u_{S\alpha} = r \cdot (1 + \bar{T}_S \cdot s) \cdot i_{S\alpha} - \frac{k_R}{T_R} \cdot \psi_{R\alpha} - k_R \cdot v \cdot p \cdot \psi_{R\beta} \end{cases} \quad (5)$$

$$u_{S\beta} = r \cdot (1 + \bar{T}_S \cdot s) \cdot i_{S\beta} - \frac{k_R}{T_R} \cdot \psi_{R\beta} + k_R \cdot v \cdot p \cdot \psi_{R\alpha} \quad (6)$$

$$0 = -r_R \cdot k_R \cdot i_{S\alpha} + \frac{1}{T_R} \cdot (1 + \bar{T}_R \cdot s) \cdot \psi_{R\alpha} + v \cdot p \cdot \psi_{R\beta} \quad (7)$$

$$0 = -r_R \cdot k_R \cdot i_{S\beta} + \frac{1}{T_R} \cdot (1 + \bar{T}_R \cdot s) \cdot \psi_{R\beta} - v \cdot p \cdot \psi_{R\alpha} \quad (8)$$

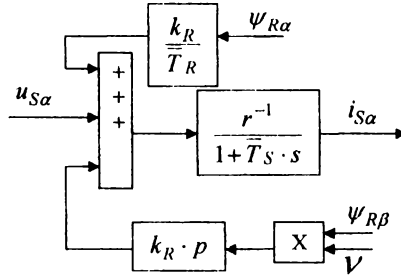
$$v = (m - m_C) \cdot \frac{1}{T_m \cdot s} \quad (9)$$

$$m = k_R \cdot (\psi_{R\alpha} \cdot i_{S\beta} - \psi_{R\beta} \cdot i_{S\alpha}) \quad (10)$$

Из уравнения (5) выразим $i_{S\alpha}$:

$$i_{S\alpha} = (u_{S\alpha} + \frac{k_R}{T_R} \cdot \psi_{R\alpha} + k_R \cdot v \cdot p \cdot \psi_{R\beta}) \cdot \frac{r^{-1}}{1 + \bar{T}_S \cdot s}$$

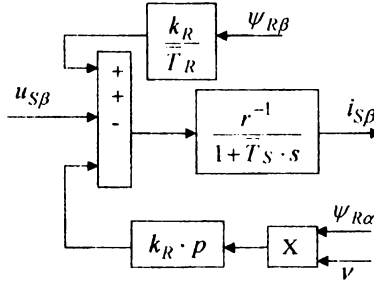
Структурная схема:



Аналогично для уравнения (6) определим $i_{S\beta}$:

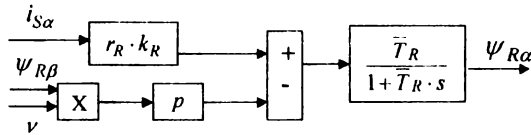
$$i_{S\beta} = (u_{S\beta} + \frac{k_R}{\bar{T}_R} \cdot \psi_{R\beta} - k_R \cdot v \cdot p \cdot \psi_{R\alpha}) \cdot \frac{r^{-1}}{1 + \bar{T}_S \cdot s}$$

Структурная схема:



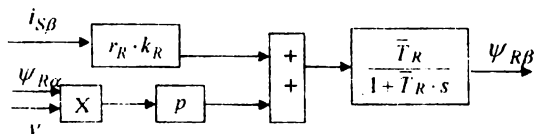
Из уравнения (7) находим $\psi_{R\alpha}$:

$$\psi_{R\alpha} = (r_R \cdot k_R \cdot i_{S\alpha} - v \cdot p \cdot \psi_{R\beta}) \cdot \frac{\bar{T}_R}{1 + \bar{T}_R \cdot s}$$



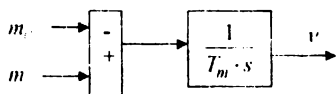
Аналогично, из уравнения (8) находим $\psi_{R\beta}$:

$$\psi_{R\beta} = (r_R \cdot k_R \cdot i_{S\beta} + v \cdot p \cdot \psi_{R\alpha}) \cdot \frac{\bar{T}_R}{1 + \bar{T}_R \cdot s}$$



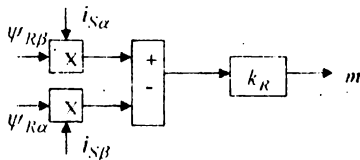
Структурная схема для уравнения (9):

$$m - m_c = \bar{T}_m \cdot s \cdot v$$



Структурная схема для уравнения (10):

$$m = k_K \cdot (\psi_{R\beta} \cdot i_{S\alpha} - \psi_{R\alpha} \cdot i_{S\beta})$$



Для моделирования выберем АКЗ со следующими паспортными данными: $P = 45 \text{ кВт}$, $U_1 = 220 \text{ В}$, $I_1 = 81,35 \text{ А}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $p = 2$, $R_s = 0,083 \text{ Ом}$, $R_r = 0,053 \text{ Ом}$, $X_{\sigma s} = 0,24 \text{ Ом}$, $X_{\sigma r} = 0,38 \text{ Ом}$, $X_m = 10 \text{ Ом}$, $J = 0,02 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Модель АКЗ, построенная по уравнениям (5) ÷ (10) представлена на рис.1.

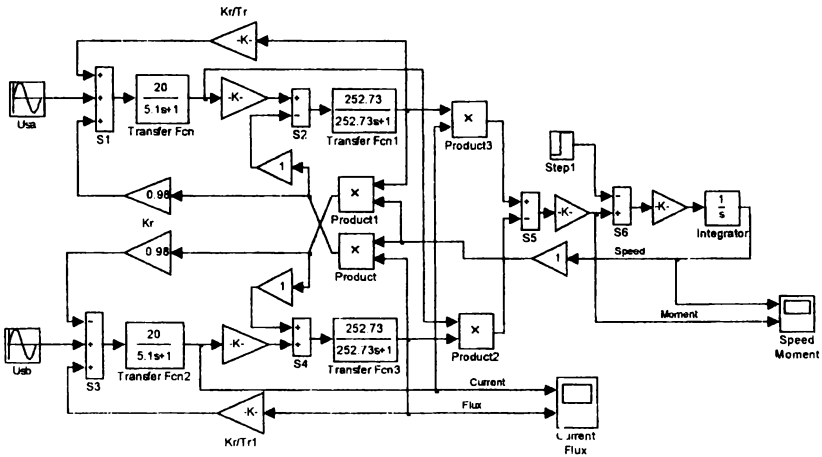
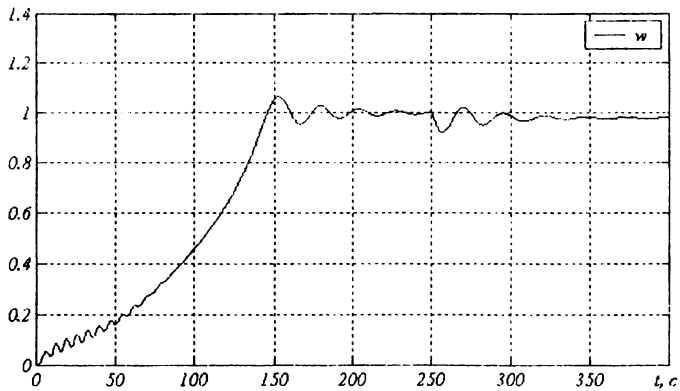


Рис. 1 Модель АКЗ в неподвижной системе координат с переменными $\bar{i}_S - \bar{\psi}_R$

На вход модели в момент времени $t = 0$ подаются напряжения $U_{\alpha\alpha} = \cos \bar{t}$, $U_{\alpha\beta} = \sin \bar{t}$, ($\alpha_k = 1$), тем самым реализуя прямой пуск. Осциллографы измеряют относительные значения электромагнитного момента и скорости. Результаты моделирования представлены на рис. 2:



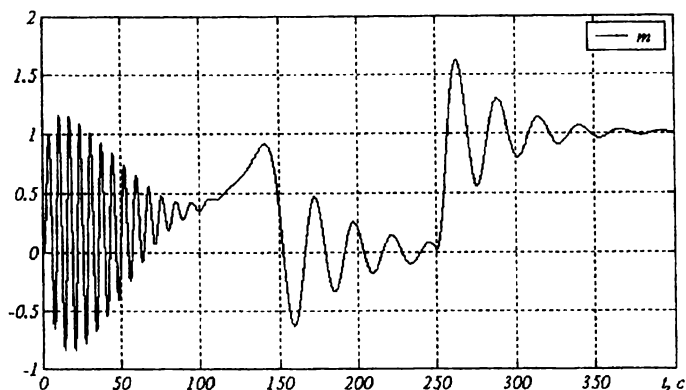


Рис. 2 Результаты моделирования, относительные значения
электромагнитного момента и скорости

Библиографический список

1. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. [Текст] / Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654с.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем Matlab 6.0 [Текст] / Учебное пособие. – Спб.: Корона принт. 2001. – 320с., ил.
3. Емельянов А.А., Клишин А.В., Медведев А.В. Математическая модель АД в неподвижной системе координат с переменными $\vec{i}_R - \vec{\psi}_R$ [Текст]/Молодой ученый. – 2010. - №4(15). – С.8-24.

Н.Е. Высоковских, Г.К. Смолин

СПОСОБЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Постоянное увеличение количества и мощности энергопотребителей предъявляет ряд требований, касающихся технической политики, экономики, и экологии в сфере энергетики. В частности, как следствие увеличения энергопотребителей, приобретают высокую актуальность такие вопросы, как повышение надежности электроснабжения и энергоресурсосбережение.