Синчук О.Н., *Украина*
Захаров В.Ю., Михайличенко Д.А. *Кременчуг*

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКА СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

На предприятиях горно-металлургической отрасли Украины эксплуатируется значительное количество синхронных электрических двигателей типов СТД и СТДП.

Пуск синхронных электрических двигателей (СЭД), предназначенных, как правило, для механизмов имеющих большие моменты инерции, согласно ПУЭ, должен производиться от пониженного напряжения для чего применяются пусковые устройства различных видов и структур в т.ч. на основе полупроводниковых преобразователей электрической энергии [1].

Одной из базовых задач в определении направления и тактики исследований по разработке и практической реализации энергоэффективных систем и законов управления ими для пуска СЭД является построение адекватной математической модели двигателя в различных системах координат и изучение с её помощью передаточных функций по различным управляющим воздействиям.

Разработка математической модели синхронного электрического двигателя в различных системах координат и изучение на ее основе передаточных функций по соответствующим управляющим воздействиям для синтеза регуляторов при векторном и частотном управлении уровнем напряжения их питания.

В основу построения математической модели положена обобщенная система дифференциальных уравнений явнополюсного СЭД Парка – Горева в векторной форме записи [2, 3]:

$$\begin{cases} \overline{U}_S = \dfrac{d\overline{\psi}_S}{dt} + j\omega_k \overline{\Psi}_S + \bar{I}_S \cdot R_S; \\ \overline{U}_R = \dfrac{d\psi_R}{dt} + j(\omega_k - \omega) \cdot \overline{\psi}_R + \bar{I}_R \cdot R_R; \\ \overline{U}_f = \dfrac{d\psi_f}{dt} + j(\omega_k - \omega) \cdot \overline{\psi}_f + \bar{I}_f \cdot R_f, \end{cases} \tag{1}$$

Для достижения цели данного исследования выберем неподвижную (ω_K=0) систему координат α и β, координаты переменных обозначены индексами → A, B.

Примем следующие обозначения: ω – угловая частота вращения ротора, $\omega_к$ – угловая частота вращения выбранной системы координат, U – напряжение, I – ток, Ψ – потокосцепление, R – сопротивление, (индекс s – относится к параметрам статора, соответственно индекс R – относится к соответствующим параметрам роторной обмотки; индекс f – к параметрам обмотки возбуждения; индексы SR, Rf, Sf – параметрам взаимоиндукции между обмотками).

Введем коэффициенты :

$$\begin{aligned} &A = 1/(L_S L_R - L_{SR}^2) \\ &A_1 = 1/(L_f L_R - L_{Rf}^2) \\ &A_2 = 1/(L_f L_S - L_{Sf}^2) \end{aligned} \tag{2}$$

При этом взаимосвязь токов и потоков можно представить в виде:

$$\begin{cases} \overline{\Psi}_S = \bar{I}_s L_S + \bar{I}_R L_{SR} + \bar{I}_f L_{Sf}; \\ \overline{\Psi}_R = \bar{I}_s L_{sr} + \bar{I}_R L_R + \bar{I}_f L_{Rf}; \\ \overline{\Psi}_f = \bar{I}_S L_{Rf} + \bar{I}_R L_{Rf} + \bar{I}_f L_f. \end{cases} \tag{3}$$

Используем систему координат: ток статора – поток ротора I_s, ψ_S для демпферной обмотки и обмотки возбуждения, а для статорной обмотки примем фазную систему координат.

Тогда токи статора в осях:

$$\begin{aligned} &I_{SA} = 1.5 \cdot I_A \\ &I_{SB} = 0.866 \cdot (I_B - I_C) \\ &Is = \sqrt{I_{SA}^2 + I_{SB}^2} \end{aligned} \tag{4}$$

Потокосцепление статора, демпферных обмоток и обмотки возбуждения:

$$
\begin{aligned}
&\psi_{SA} = (I_{SA} / A + \psi_{RA} \cdot L_{SR} + \psi_f \cdot L_{Sf}) / L_S \\
&\psi_{SB} = (I_{SB} / A + \psi_{RB} \cdot L_{SR}) / L_S \\
&\psi_S = \sqrt{\psi_{SA}{}^2 + \psi_{SB}{}^2} \\
&\psi_{Ra} = (I_{RA} / A_1 + \psi_{RA} \cdot L_{SR} + \psi_f \cdot L_{Rf}) / L_R \\
&\psi_{RB} = (I_{rB} / A_1 + \psi_{RB} \cdot L_{SR}) / L_R \\
&\psi_R = \sqrt{\psi_{RA}{}^2 + \psi_{RB}{}^2} \\
&\psi_{fA} = (I_{SA} / A_2 + \psi_{RA} \cdot L_{Rf} + \psi_{SA} \cdot L_{Sf}) / L_f \\
&\psi_{fA} = (I_{SB} / A_2 + \psi_{RB} \cdot L_{Rf} + \Psi_{SB} \cdot L_{Sf}) / L_f \\
&\psi_f = \sqrt{\psi_{fA}{}^2 + \psi_{fB}{}^2}
\end{aligned}
\tag{5}
$$

Токи демпферной (пусковой) обмотки I_R,:

$$
\begin{aligned}
&I_{RA} = A \cdot \psi_{RA} \cdot L_S - A \cdot \psi_{SA} \cdot L_{SR} - A_1 \cdot \psi_{fA} \cdot L_{Sf} \\
&I_{RB} = A \cdot \psi_{RB} . L_S - A \cdot \psi_{SB} \cdot L_{SR} - A_1 \cdot \psi_{fB} \cdot L_{Sf} \\
&I_R = \sqrt{I_{RA}{}^2 + I_{RA}{}^2}
\end{aligned}
\tag{6}
$$

Токи обмотки возбуждения I_f :

$$
\begin{aligned}
&I_{fA} = \psi_{fA} \cdot L_f + \psi_{RA} \cdot L_{Rf} \cdot A_2 + \psi_{SA} \cdot L_{Sf} \cdot A_1 \\
&I_{fB} = \psi_{fB} \cdot L_f + \psi_{RB} \cdot L_{Rf} \cdot A_2 + \psi_{SB} \cdot L_{Sf} \cdot A_1 \\
&I_f = \sqrt{I_{fA}{}^2 + I_{fB}{}^2}
\end{aligned}
\tag{7}
$$

Определение электромагнитного момента:

$$
M_E = 3L_{SR} A(\psi_{SA}\psi_{RB} - \psi_{SB}\psi_{RA}) / 2 + 3L_{SF} A_1(\psi_{SA}\psi_{fB} - \psi_{SB}\psi_{fA}) / 2 \tag{8}
$$

Формирование фазы синусоидального питающего напряжения и модель напряжений синхронного двигателя в трехфазных координатах :

$$
\begin{aligned}
&\frac{d\theta_C}{dt} = \omega_C \\
&\theta_C = \theta_C - 2\pi \ \text{ если } \theta_C > 2\pi \\
&Ua = U_m \sin(\theta_C) \\
&Ub = U_m \sin(\theta_C + 2\pi / 3)) \\
&Uc = U_m \sin(\theta_C - 2\pi / 3))
\end{aligned}
\tag{9}
$$

Уравнения движения ротора примет вид:

$$
\frac{d\omega}{dt} = (M_E - M_H) / J \tag{10}
$$

где M_E – электромагнитный момент, развиваемый синхронным двигателем; M_H – момент нагрузки; J – момент инерции синхронного двигателя и механизма.

Уравнения для производных потокосцеплений демпферных контуров ψ_R и обмотки возбуждения ψ_f :

$$
\begin{aligned}
&\frac{d\psi_{RA}}{dt} = -I_{RA} R_R + \psi_{RB}\omega + \psi_{fB}\omega L_{Rf} / L_f \\
&\frac{d\psi_{RB}}{dt} = -I_{RB} R_R - \psi_{RA}\omega - \psi_{fA}\omega L_{Rf} / L_f \\
&\frac{d\psi_{fA}}{dt} = -I_f R_f + \psi_{fB}\omega + \psi_{RA}\omega L_{Rf} / L_f + u_f \sin\theta_{Uf} \\
&\frac{d\psi_{fB}}{dt} = -I_f R_f - \psi_{fA}\omega - \psi_{RA}\omega L_{Rf} / L_f - u_f \sin\theta_{Uf}
\end{aligned}
\tag{11}
$$

где θ_{Uf} – угол между вектором потока, создаваемым током обмоткой возбуждения и вектором напряжения.

Уравнения ЭДС цепи статора в трехфазной системе:

$$
\begin{aligned}
&E_{SA} = \frac{3}{2}\left(\frac{d\psi_a}{dt}\right) L_m / L_r - \psi_a R_r / L_r + \psi_b \omega + \omega\psi_f \\
&E_{SB} = [-0.5\left(\frac{d\psi_a}{dt}\right) + \frac{d\psi_b}{dt}\sqrt{3} / 2] L_m / L_r \\
&E_{SC} = [-0.5\left(\frac{d\psi_a}{dt}\right) - \frac{d\psi_b}{dt}\sqrt{3} / 2] L_m / L_r
\end{aligned}
\tag{12}
$$

Производные потокосцепления статора в трехфазной системе:

$$
\begin{aligned}
&\frac{d\psi_a}{dt} = (Usa - IaR_S - Esa) AL_S \\
&\frac{d\psi_b}{dt} = (Usb - IbR_S - Esb) AL_S \\
&\frac{d\psi_c}{dt} = (Usc - IcR_S - Esc) AsL_S
\end{aligned}
\tag{13}
$$

Уравнения 11–13 с уравнениями связи составляют:

$$M_E = \frac{3L_{SR}A(\psi_{SA}\psi_{RB} - \psi_{SB}\psi_{RA}) + 3L_{fS}A(\psi_{Sa}\psi_{Rb} - \psi_{Sb}\psi_{Ra})}{2}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_E + M_H}{j}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \omega \qquad (14)$$

Полученная модель является нелинейной за счет наличия перекрестных связей по моменту и противо-ЭДС вращения, наводимых в обмотках двигателя.

Решение, полученных уравнений (14) позволяет исследовать переходные процессы в явнополюсном или неявнополюсном СЭД с различными законами формирования фазных напряжений двигателя, потока возбуждения и нагрузки.

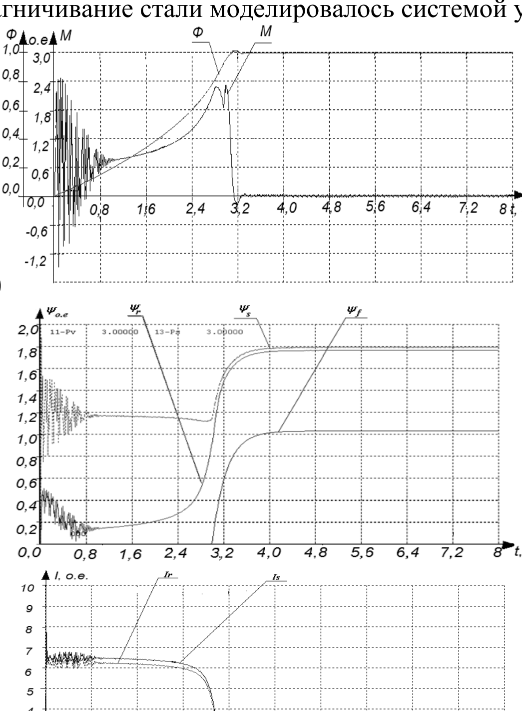
Для решения поставленной задачи используем программную среду Фортран.

Адекватность модели синхронного двигателя в координатах ток статора I_s – потокосцепление статора – ψ_S подтверждается результатами расчетов, приведенных на рис. 1 совпадающих с результатами опубликованными в технической литературе.

В действительности в СЭД имеет место магнитное насыщение стали. Учет эффекта насыщения следует производить с помощью ограничения магнитного потока стали статора и ротора. Эффект насыщения осуществляется алгоритмом:

если $\psi_s > \psi_{Nas}$, то $\psi_s = \psi_{Nas}$ 　　　　 если $\psi_R > \psi_{Nas}$, то $\psi_R = \psi_{Nas}$ 　　　　(15)

На рис. 2 приведены графики переходных процессов в синхронном двигателе с учетом насыщения стали. Намагничивание стали моделировалось системой уравнений (15).

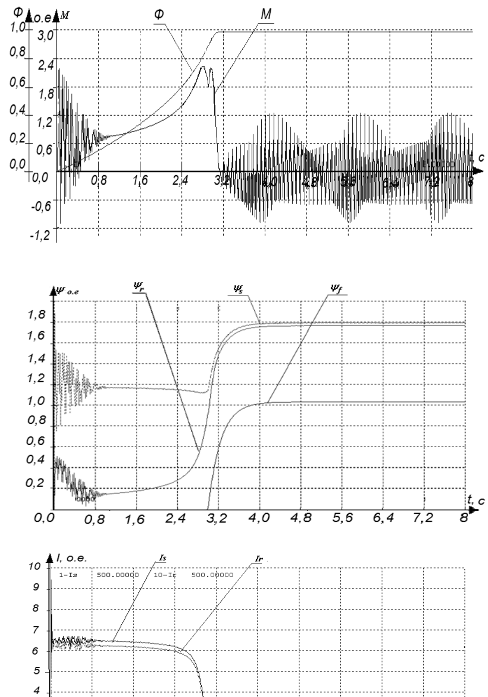


а)

б)

в)

Рис. 1 Машинограммы переходных процессов синхронного двигателя при прямом пуске:
а) по моменту М и частоте вращения ω (Ф);
б) по потокосцеплениям статора,ротора и возбуждения; в) по току статора и ротора.



а)

б)

в)

Рис. 2 Машинограммы переходных процессов синхронного двигателя при прямом пуске с учетом насыщения стали:
а) по моменту – М и частоте вращения ω (Ф);
б) по потокосцеплениям статора, ротора, возбуждения и частоте вращения; в) по току статора и ротора.

Дополнительным основным моментом пуска СЭД является и то, что из-за насыщения стали имеет место факт ограничение потокосцепления, что ухудшает динамику систем.

Улучшить динамические и энергетические показатели при пуске синхронного двигателя можно, используя плавный пуск – линейно изменяющихся во времени напряжения и частоты.

На рис. 3 приведены машинограммы переходных процессов синхронного двигателя при плавном пуске с учетом насыщения стали

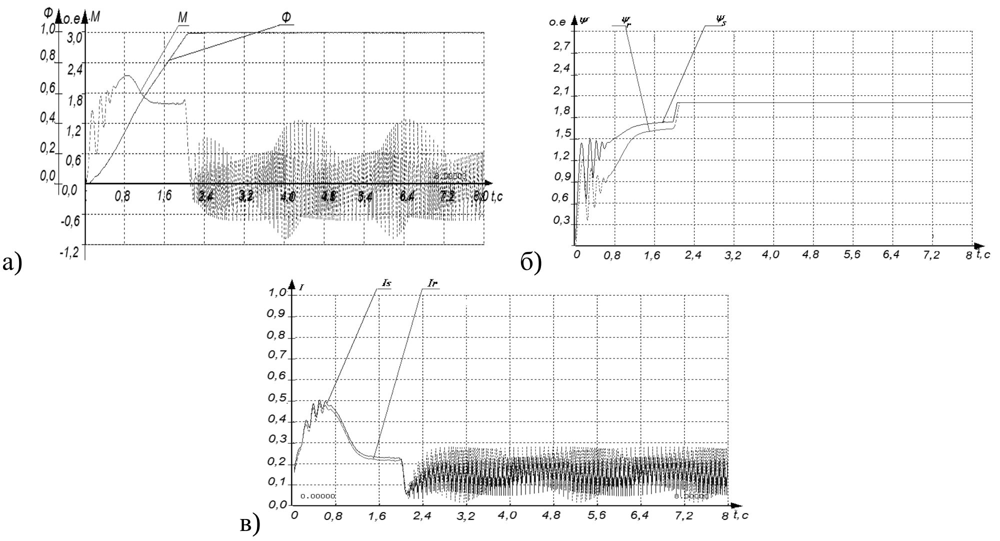


Рис. 3 Машинограммы переходных процессов
синхронного двигателя при плавном пуске с учетом насыщения стали:
а) по моменту – М и частоте вращения – ω (Ф); б) по потокосцеплениям статора,
ротора, возбуждения и частоте вращения; в) по току статора и ротора.

Анализ полученных результатов показывает, что при линейном задании пуск происходит в 2 раза быстрее, а момент при низких скоростях вращения не имеет высокочастотных составляющих (рис. 3, а). Потокосцепление при низких частотах так же не имеет высокочастотных составляющих (рис.3, б) и ограничено насыщением стали. Переходные процессы по токам статора и ротора СЭД представлены на рис.3,в.

На рис. 4 приведены кривые потребления электроэнергии для рассматриваемых моделей.

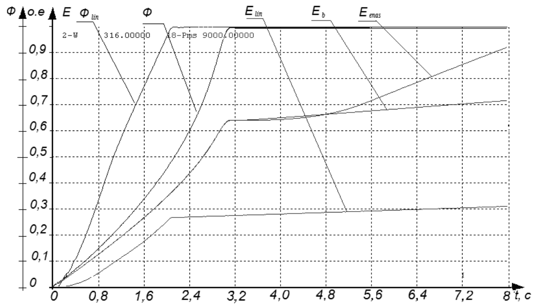


Рис. 4 Графики потребления электроэнергии при прямом пуске *Ee*, пуске с учетом насыщения *Eenas* и при линейном пуске *Elin.*

Из полученных результатов видно, что при линейном пуске потребление электрической энергии на 30–40% ниже, чем при прямом пуске.

Предложенные математические модели синхронного двигателя адекватно отражают процессы, протекающие в реальном двигателе и могут быть использованы для исследований по оценке эффективности применения различных пусковых устройств и законов управления ими для СЭД.

Насыщение стали синхронного двигателя приводят к возникновению высокочастотных колебаний, модулируемых низкочастотными колебаниями. Амплитуда пиков тока может достигать 40–90% от номинальных значений тока.

Потребление электроэнергии при линейном пуске с помощью IGBT-преобразователей на 30–40% меньше, чем при прямом пуске.

Список использованной литературы

1. Синчук И.О. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления./ Синчук И.О., Чернышев А.А., Киба И.И., Пасько О.В., Ключка О.Е., Мельник О.Е./ Учебное пособие. Под редакцией проф. Синчука О.Н. – Кременчуг, Вид. Щербатих О.В., 2008. – 88с.

2. Зеленов А.Б. Теория электропривода: Учебное пособие. Часть I. – Алчевск: ДонГТУ, 2005. – 394 с.

3. Башарин А.В., Постников Ю.В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 512с.