

УДК 622.625.28-83

**О. Н. Синчук**, д-р техн. наук,  
**В. Ю. Захаров**, канд. техн. наук,  
**Д. А. Михайличенко**

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУСКА НЕЯВНОПОЛЮСНОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Изложены результаты исследований по моделированию пуска с применением IGBT-регуляторов неявнополюсных синхронных электрических двигателей. Приведены графики переходных процессов, подтверждающие энергоэффективность предлагаемых алгоритмов управления и структур регуляторов.*

*Ключевые слова:* синхронный электрический двигатель, пуск, регулирование.

**O. N. Sinchuk**, ScD.,  
**V. I. Zakharov**, PhD.,  
**D. A. Mikhaylichenko**

### SYNCHRONOUS IMPLICIT-POLE ELECTRIC ENGINE START-UP MODELING

*In the article the results of researches of simulation (modeling) start-up with IGBT- regulators not salient-pole electric synchronous engines. The graphs of transient processes confirm energy efficiency of the proposed control algorithm and structures regulators.*

*Keywords:* electric synchronous engine, start-up, regulation.

**О. М. Сінчук**, д-р техн. наук,  
**В. І. Захаров**, канд. техн. наук,  
**Д. А. Михайличенко**

### МОДЕЛЮВАННЯ ПУСКУ НЕЯВНОПОЛЮСНОГО СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

*Викладенно результати досліджень з моделювання пуску з використанням перетворювачів неявнополюсних синхронних електричних двигунів. Наведено графіки перехідних процесів котрі підтверджують енергоефективність запропонованих алгоритмів керування та структур регуляторів.*

*Ключові слова:* синхронний електричний двигун, пуск, регулювання.

**Введение.** На предприятиях горно-металлургической отрасли Украины эксплуатируется значительное количество неявнополюсных синхронных электрических двигателей типов СТД И СТДП.

**Актуальность.** 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 том числе на основе полупроводниковых преобразователей электрической энергии [1]. Данное направление эффективно еще и потому, что законы (алгоритмы) формирования питающего напряжения преобразователями при пуске неявнополюсного СЭД могут быть

весьма многообразными, что важно как весомый фактор электроэнергосбережения [1].

Одной из базовых задач в определении направления и тактики исследований по разработке и практической реализации таких 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.

**Цель исследований.** 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.

© Синчук О.Н., Захаров В.Ю.,  
Михайличенко Д.А., 2012

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{U}_S = \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} + j\omega_k \bar{\Psi}_S + \bar{I}_S R_S; \\ \bar{U}_R = \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + j(\omega_k - \omega) \bar{\Psi}_R + \bar{I}_R R_R; \\ \bar{U}_f = \frac{d\bar{\Psi}_f}{dt} + j(\omega_k - \omega) \bar{\Psi}_f + \bar{I}_f R_f. \end{array} \right. \quad (1)$$

Как правило, математические модели СЭД строятся в различных системах координат исходя из целей и удобства решения поставленной задачи [2, 3].

Для достижения цели данного исследования выберем неподвижную ( $\omega_k = 0$ ) систему координат  $\alpha$  и  $\beta$ , координаты переменных обозначены индексами А, В.

Примем следующие обозначения:

$\omega$  – угловая частота вращения ротора;

$\omega_k$  – угловая частота вращения выбранной системы координат;

$U$  – напряжение;

$I$  – ток;

$\Psi$  – потокосцепление;

$R$  – сопротивление.

Индекс  $s$  – применяется для обозначения параметров статора, индекс  $R$  – параметров роторной обмотки; индекс  $f$  – параметров обмотки возбуждения; индексы  $SR, Rf, Sf$  – параметров взаимной индукции между обмотками.

Введем коэффициенты

$$\left\{ \begin{array}{l} A = 1 / (L_S L_R - L_{SR}^2), \\ A_1 = 1 / (L_f L_R - L_{Rf}^2), \\ A_2 = 1 / (L_f L_S - L_{Sf}^2). \end{array} \right. \quad (2)$$

При этом взаимосвязь токов и потоков можно представить в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\Psi}_S = \bar{I}_S L_S + \bar{I}_R L_{SR} + \bar{I}_f L_{Sf}; \\ \bar{\Psi}_R = \bar{I}_S L_{SR} + \bar{I}_R L_R + \bar{I}_f L_{Rf}; \\ \bar{\Psi}_f = \bar{I}_S L_{Sf} + \bar{I}_R L_{Rf} + \bar{I}_f L_f. \end{array} \right. \quad (3)$$

Используем систему координат: ток статора – поток ротора  $I_S, \Psi_S$  для демпферной обмотки и обмотки возбуждения, а для статорной обмотки примем фазную систему координат.

Тогда токи статора в осях:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{SA} = 1,5 I_A, \\ I_{SB} = 0,866(I_B - I_C), \\ I_S = \sqrt{I_{SA}^2 + I_{SB}^2}. \end{array} \right. \quad (4)$$

Потокосцепление статора, демпферных обмоток в и обмотки возбуждения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{SA} = (I_{SA} / A + \Psi_{RA} L_{SR} + \Psi_f L_{Sf}) / L_S, \\ \Psi_{SB} = (I_{SB} / A + \Psi_{RB} L_{SR}) / L_S, \\ \Psi_S = \sqrt{\Psi_{SA}^2 + \Psi_{SB}^2}, \\ \Psi_{Ra} = (I_{RA} / A_1 + \Psi_{RA} L_{SR} + \Psi_f L_{Rf}) / L_R, \\ \Psi_{Rb} = (I_{Rb} / A_1 + \Psi_{RB} L_{SR}) / L_R, \\ \Psi_R = \sqrt{\Psi_{Ra}^2 + \Psi_{Rb}^2}, \\ \Psi_{fA} = (I_{SA} / A_2 + \Psi_{RA} L_{Rf} + \Psi_{SA} L_{Sf}) / L_f, \\ \Psi_{fB} = (I_{SB} / A_2 + \Psi_{RB} L_{Rf} + \Psi_{SB} L_{Sf}) / L_f, \\ \Psi_f = \sqrt{\Psi_{fA}^2 + \Psi_{fB}^2}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Токи демпферной (пусковой) обмотки  $I_R$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{RA} = A \Psi_{RA} L_S - A \Psi_{SA} L_{SR} - A_1 \Psi_{fA} L_{Sf}, \\ I_{RB} = A \Psi_{RB} L_S - A \Psi_{SB} L_{SR} - A_1 \Psi_{fB} L_{Sf}, \\ I_R = \sqrt{I_{RA}^2 + I_{RB}^2}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Токи обмотки возбуждения  $I_f$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{fA} = \Psi_{fA} L_f + \Psi_{RA} L_{Rf} A_2 + \Psi_{SA} L_{Sf} A_1, \\ I_{fB} = \Psi_{fB} L_f + \Psi_{RB} L_{Rf} A_2 + \Psi_{SB} L_{Sf} A_1, \\ I_f = \sqrt{I_{fA}^2 + I_{fB}^2}. \end{array} \right. \quad (7)$$

Электромагнитный момент определяется так:

$$\begin{aligned} M_E = & 3L_{SR} A (\Psi_{SA} \Psi_{RB} - \Psi_{SB} \Psi_{RA}) / 2 + \\ & + 3L_{Sf} A_1 (\Psi_{SA} \Psi_{fB} - \Psi_{SB} \Psi_{fA}) / 2. \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_C}{dt} = \omega_C, \\ \theta_C = \theta_C - 2\pi \text{ если } \theta_C > 2\pi, \\ Ua = U_m \sin(\theta_C), \\ Ub = U_m \sin(\theta_C + 2\pi/3), \\ Uc = U_m \sin(\theta_C - 2\pi/3). \end{array} \right. \quad (9)$$

Уравнения движения ротора

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

где  $M_E$  – электромагнитный момент, развиваемый синхронным двигателем;  $M_H$  – мо-

мент нагрузки;  $J$  – момент инерции синхронного двигателя и механизма.

Уравнения для производных потокосцеплений демпферных контуров  $\psi_R$  и обмотки возбуждения  $\psi_f$ :

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{RA}}{dt} &= -I_{RA}R_R + \psi_{RB}\omega + \psi_{fB}\omega L_{Rf} / L_f, \\ \frac{d\psi_{RB}}{dt} &= -I_{RB}R_R - \psi_{RA}\omega - \psi_{fA}\omega L_{Rf} / L_f, \\ \frac{d\psi_{fA}}{dt} &= -I_fR_f + \psi_{fB}\omega + \psi_{RA}\omega L_{Rf} / L_f + u_f \sin \theta_{Uf}, \\ \frac{d\psi_{fB}}{dt} &= -I_fR_f - \psi_{fA}\omega - \psi_{RA}\omega L_{Rf} / L_f - u_f \sin \theta_{Uf}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\theta_{Uf}$  – угол между вектором потока, создаваемым током обмотки возбуждения, и вектором напряжения.

Уравнения ЭДС цепи статора в трехфазной системе:

$$\begin{aligned} E_{SA} &= \frac{3}{2} \left( \frac{d\psi_a}{dt} \right) L_m / L_r - \psi_a R_r / L_r + \psi_b \omega + \omega \psi_f, \\ E_{SB} &= [-0,5 \left( \frac{d\psi_a}{dt} \right) + \frac{d\psi_b}{dt} \sqrt{3} / 2] L_m / L_r, \\ E_{SC} &= [-0,5 \left( \frac{d\psi_a}{dt} \right) - \frac{d\psi_b}{dt} \sqrt{3} / 2] L_m / L_r. \end{aligned} \quad (12)$$

Производные потокосцепления статора в трехфазной системе:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_a}{dt} &= (U_{sa} - I_a R_s - E_{sa}) A L_s, \\ \frac{d\psi_b}{dt} &= (U_{sb} - I_b R_s - E_{sb}) A L_s, \\ \frac{d\psi_c}{dt} &= (U_{sc} - I_c R_s - E_{sc}) A L_s. \end{aligned} \quad (13)$$

Уравнения (11) – (13) с уравнениями связи составляют:

$$\begin{aligned} M_E &= \frac{3L_{SR} A (\psi_{SA} \psi_{RB} - \psi_{SB} \psi_{RA}) + 3L_{fS} A (\psi_{SA} \psi_{fB} - \psi_{SB} \psi_{fA})}{2}, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{M_E + M_H}{j}, \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega. \end{aligned} \quad (14)$$

Полученная модель является нелинейной за счет наличия перекрестных связей по моменту и против-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. Главное назначение Фортран – это быстрый счет в различных научно-технических приложениях.

Для решения нелинейной многосвязанной системы дифференциальных уравнений используется метод Рунге–Кутты 4-го порядка. Этот метод весьма точен, дает ошибку  $\sigma = 0,628 \cdot 10^{-8}$  при расчете с допустимым по устойчивости решения шагом интегрирования в восьмом или девятом знаке [1].

Адекватность модели синхронного двигателя в координатах ток статора  $I_s$  – потокосцепление статора  $\psi_S$  подтверждается результатами расчетов, приведенных на рис. 1-3, совпадающих с результатами, опубликованными в технической литературе.

На рис. 1 показаны графики переходных процессов момента  $M$  и частоты вращения  $\omega$  синхронного двигателя при прямом пуске.

Использование разрядного сопротивления при пуске двигателя моделируем следующим образом.

Если  $\omega < 0,9 \omega_{\text{синх}}$ . то  $R_R = R_R + R_{\text{разряд}}$ ;  $U_R = 0$ .

Если  $\omega > 0,9 \omega_{\text{синх}}$ . то  $R_R = R_R$ ;  $U_R = U_{\text{возб}}$ .

При прямом включении на сеть обмотка возбуждения включена на разрядное сопротивление и отключена от напряжения возбуждения. При малых скоростях вращения в течение 1,6 с момент СЭД, работающего в режиме асинхронного пуска (рис. 1), потокосцепления (рис. 2), а также токи статора и короткозамкнутой обмотки ротора (рис. 3) имеют колебательный характер с частотой питающей сети.

Среднее значение момента – пусковой момент  $M_{II}$  лежит в пределах 0,7–1,2 от номинального значения момента  $M_H$ . Значения пусковых токов статора и короткозамкнутой обмотки ротора составляют 4,8–5,2 номинального тока  $I_H$ .

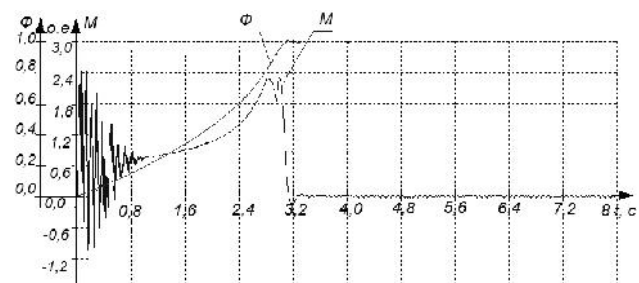


Рис. 1. Графики момента  $M$  и частоты вращения  $\omega$  синхронного двигателя при прямом пуске

Согласно алгоритму пуска СЭД при достижении скорости вращения  $\omega = 0,9 \cdot 314 = 282 \text{ с}^{-1}$  при  $t \approx (2,8 \dots 3,2) \text{ с}$  отключается разрядное сопротивление и подается напряжение возбуждения (рис. 2). При этом увеличивается магнитный поток в воздушном зазоре двигателя, и он втягивается в синхронизм и достигает синхронной скорости.

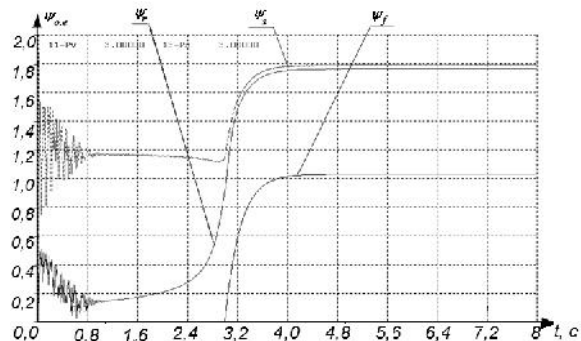


Рис. 2. Графики переходных процессов потокоцепления статора, ротора и возбуждения синхронного двигателя при прямом пуске

С момента времени  $t \approx (1,0 \dots 1,2) \text{ с}$  по окончании колебаний до подачи возбуждения колебания электромагнитного момента  $M$ ,  $\psi_s$ ,  $\psi_r$ ,  $I_s$ ,  $I_r$  носят гладкий характер, что подтверждается известными теоретическими и практическими исследованиями [2]. Минимальный электромагнитный момент  $M_{MIN} = (0,6 \dots 1,2) M_{НОМ}$ , максимальный момент  $M_{MAX} = (1,9 \dots 2,2) M_{НОМ}$ .

Среднее значение пусковых токов  $I_s$ ,  $I_r$  кратно  $\approx 5$ . Токи  $I_s$ ,  $I_r$  при синхронной скорости вращения равны нулю. Вхождение в синхронизм характеризуется апериодическими процессами.

Переходные процессы в СЭД при наличии возбуждения описываются дифференциальным уравнением второго порядка [8]. Если корни характеристического уравнения комплексные, то переходный процесс будет колебательный с затуханием относительно тока статического равновесия (рис. 3).

В начальный момент времени при определенных параметрах СЭД возможны всплески тока, пик которых достигает 10-кратных значений от номинального тока. При этом время действия этих токов очень мало и его в реальных условиях не учитывают [2].

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 простым алгоритмом:

$$\begin{aligned} \text{если } \psi_s > \psi_{Nas}, \text{ то } \psi_s &= \psi_{Nas}, \\ \text{если } \psi_r > \psi_{Nas}, \text{ то } \psi_r &= \psi_{Nas}. \end{aligned} \quad (16)$$

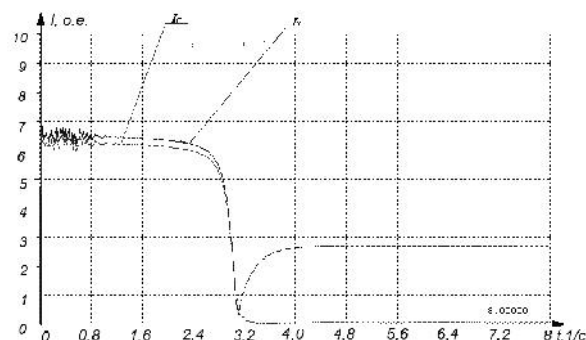


Рис. 3. Графики переходных процессов тока статора, ротора синхронного двигателя при прямом пуске

На рис. 4–6 приведены графики переходных процессов в синхронном двигателе с учетом насыщения стали. Намагничивание стали моделировалось системой уравнений (16).

Дополнительным важным моментом пуска СЭД является и то, что из-за насыщения стали, ограничивается потокоцепление, что ухудшает динамику систем. Ограничение по насыщению приводит к возникновению колебаний электромагнитного момента при подаче возбуждения ( $t = 2,8 \dots 3,4 \text{ с}$ ) (рис.4). При этом амплитуда колебаний высокочастотных составляющих момента может достигать номинальных значений.

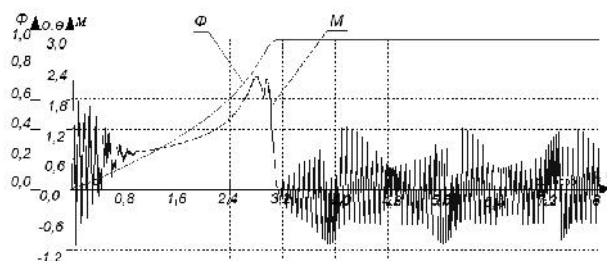


Рис. 4. Графики переходных процессов момента –  $M$  и частоты вращения  $\omega$  синхронного двигателя при прямом пуске с учетом насыщения стали

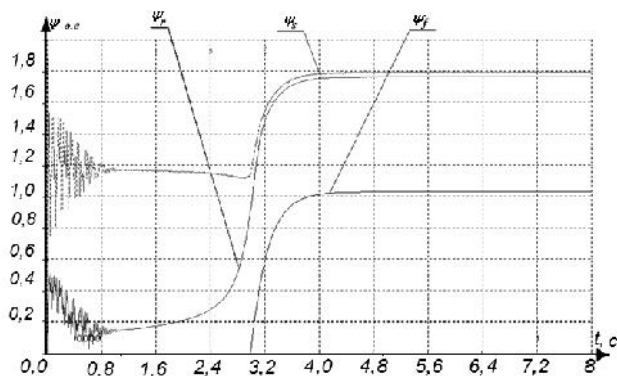


Рис. 5. Графики переходных процессов потокоцепления статора, ротора, возбуждения и частоты вращения  $\omega$  синхронного двигателя при прямом пуске с учетом насыщения стали

Переходные процессы токов статора и ротора до входа в синхронизм аналогичны процессам без учета насыщения. При входе в синхронизм токи содержат высокочастотные составляющие, которые являются причиной повышенного потребления электрической энергии. Для сравнения на рис. 7 приведены графики потребления электроэнергии без учета и учетом насыщения стали. Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что потребление электроэнергии в реальных условиях из-за насыщения стали, увеличиваются на 20 % (рис. 6, 7).

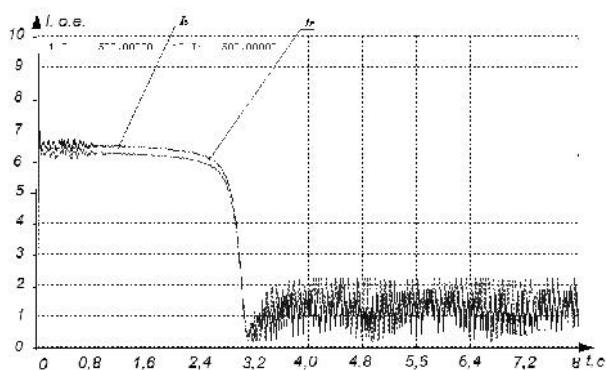


Рис. 6. Графики переходных процессов тока статора и ротора синхронного двигателя при прямом пуске с учетом насыщения стали

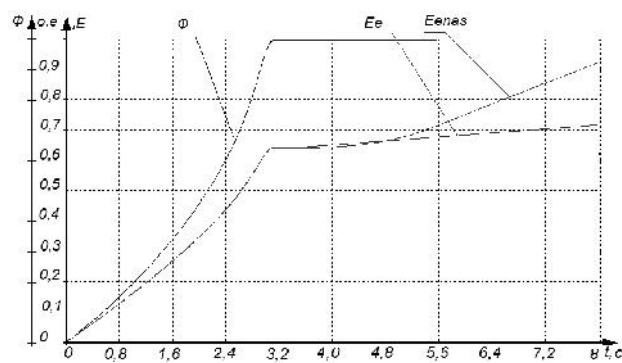


Рис. 7. Графики потребления электрической энергии при моделировании синхронного двигателя без учета –  $E_e$  и с учетом насыщения –  $E_{enas}$  стали

Улучшить динамические и энергетические показатели при пуске синхронного двигателя можно, используя плавный пуск – линейно изменяющихся во времени напряжения и частоты. Графики переходных процессов скорости вращения при линейном задании приведены на рис. 8, а момента – на рис.9.

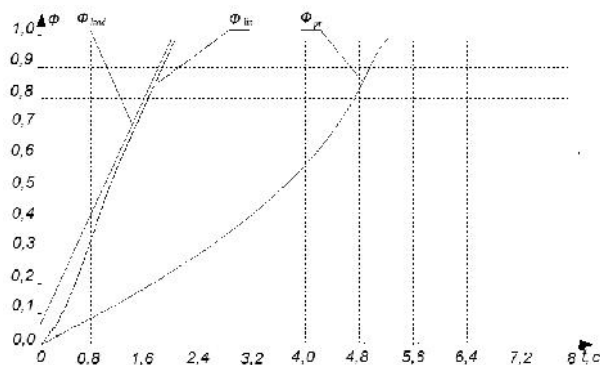


Рис. 8. Графики переходных процессов скорости вращения при линейном и ступенчатом задании скорости (прямом пуске)

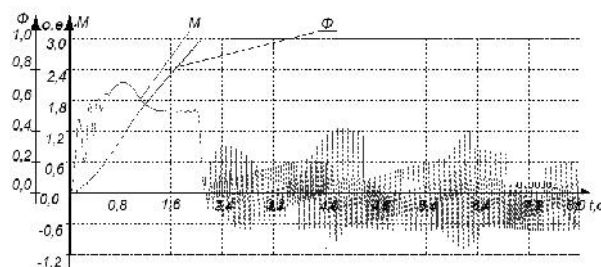


Рис. 9. Графики переходных процессов момента  $M$  и частоты вращения  $\omega$  синхронного двигателя при плавном пуске с учетом насыщения стали

Анализ полученных результатов показывает, что при линейном задании пуск происходит в два раза быстрее, а момент при низких скоростях вращения не имеет высокочастотных составляющих.

Потокоцепление при низких частотах так же не имеет высокочастотных составляющих (рис. 10) и ограничено насыщением стали.

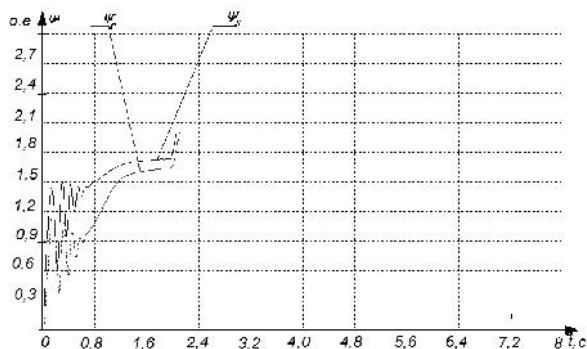


Рис. 10. Графики переходных процессов потокоцепления статора, ротора, возбуждения и частоты вращения  $\omega$  синхронного двигателя при плавном пуске с учетом насыщения стали

Переходные процессы по токам статора и ротора СЭД представлены на рис.11.

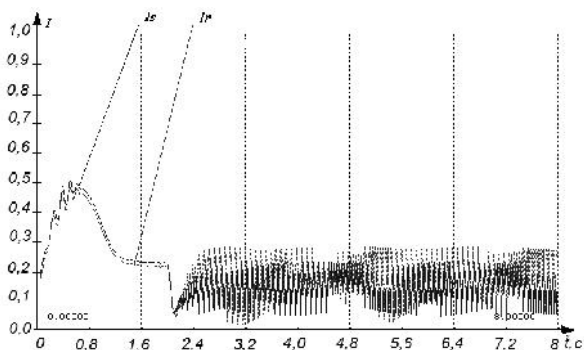


Рис. 11. Графики переходных процессов тока статора, ротора синхронного двигателя при плавном пуске с учетом насыщения стали

Качество переходных процессов по токам при плавном пуске улучшается до момента входа СЭД в синхронизм. Далее характер переходных процессов такой же, как и при подаче возбуждения с учетом насыщения.

На рис. 12 приведены кривые потребления электроэнергии для рассматриваемых моделей.

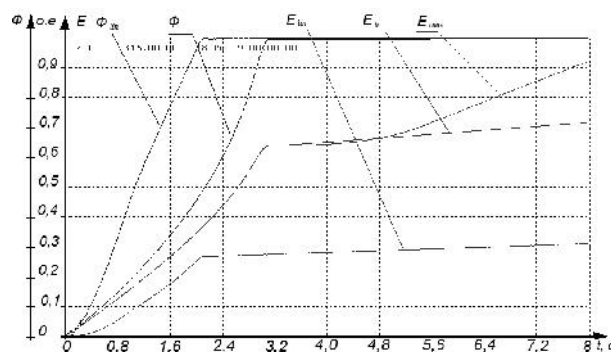


Рис. 12. Графики потребления электроэнергии при прямом пуске  $E_e$ , пуске с учетом насыщения  $E_{enas}$  и при линейном пуске  $E_{lin}$

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

#### Выводы

1. 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.

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

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

#### Список использованной литературы

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

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

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

Получено 10.06.2012

### References

1. Semiconductor transformers of electric energy are in the structures of electromechanics / I. O. Sinchuk, A. A. Chernishev, I. I. Kiba, O. V. Pas'ko, O. E. Kluchka, O. E. Mel'nik // Vid. Sherbatih. – Kremenchuk : – 2008. – 88 p. [in Russian].

2. Zelenov, A. B. Theory of automatic electric drive. / A. B. Zelenov. – Alchevsk :– 2005. DonGTU, – Part 1. – 394 p. [in Russian].

3. Basharin, A. V., Postnikov, Y. V. Examples of calculation of automatic electric drive on computer / A. V. Basharin, Y. V. Postnikov / – Leningrad : Energoatomizdat, 1990 – 512 p. [in Russian].



Синчук  
Олег Николаевич,  
д-р техн. наук,  
проф., зав.каф. СПЭЭТ,  
ГВУЗ Криворожск. нац.  
ун-та.  
Украина, г. Кривой Рог  
ул. XXII партсъезда, 11.  
E-mail: speet@ukr.net



Захаров  
Вячеслав Юрьевич,  
канд. техн. наук, доц.  
каф. ТСБДД, Нац.  
транспорт. ун-та. Учебно-консультационный  
центр.  
г. Кривой Рог



Михайличенко  
Дмитрий Анатольевич,  
ст. преподаватель каф.  
СЭЭМ Кременчугск.  
нац. ун-та им. Михаила  
Остроградского.  
Украина, г. Кременчуг,  
ул. Первомайская 20,  
E-mail:  
seem@kdu.edu.ua