

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

Аннотация. 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

Abstract. 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

Анотація. Викладено 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 положения 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 α и β , координаты переменных обозначены индексами А, В.

Примем следующие обозначения:

ω – угловая частота вращения ротора;

ω_k – угловая частота вращения выбранной системы координат;

U – напряжение;

I – ток;

Ψ – 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

$$\begin{aligned} A &= 1 / (L_s L_r - L_{sr}^2), \\ A_1 &= 1 / (L_f L_r - L_{rf}^2), \\ A_2 &= 1 / (L_f L_s - L_{sf}^2). \end{aligned} \quad (2)$$

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, ψ_s для демпферной обмотки и обмотки возбуждения, а для статорной обмотки примем фазную систему координат.

Тогда токи статора в осях:

$$\begin{aligned} I_{sA} &= 1,5 I_A, \\ I_{sB} &= 0,866(I_B - I_C), \\ I_s &= \sqrt{I_{sA}^2 + I_{sB}^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Потокосцепление статора, демпферных обмоток в и обмотки возбуждения:

$$\begin{aligned} \Psi_{sA} &= (I_{sA} / A + \Psi_{RA} L_{SR} + \Psi_f L_{Sf}) / L_s, \\ \Psi_{sB} &= (I_{sB} / A + \Psi_{RB} L_{SR}) / L_s, \\ \Psi_s &= \sqrt{\Psi_{sA}^2 + \Psi_{sB}^2}, \\ \Psi_{ra} &= (I_{rA} / A_1 + \Psi_{RA} L_{SR} + \Psi_f L_{Rf}) / L_r, \\ \Psi_{rb} &= (I_{rB} / A_1 + \Psi_{RB} L_{SR}) / L_r, \\ \Psi_r &= \sqrt{\Psi_{ra}^2 + \Psi_{rb}^2}, \\ \Psi_{fA} &= (I_{fA} / A_2 + \Psi_{RA} L_{Rf} + \Psi_{SA} L_{Sf}) / L_f, \\ \Psi_{fB} &= (I_{fB} / A_2 + \Psi_{RB} L_{Rf} + \Psi_{SB} L_{Sf}) / L_f, \\ \Psi_f &= \sqrt{\Psi_{fA}^2 + \Psi_{fB}^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Токи демпферной (пусковой) обмотки I_R :

$$\begin{aligned} I_{rA} &= A \Psi_{RA} L_s - A \Psi_{SA} L_{SR} - A_1 \Psi_{fA} L_{Sf}, \\ I_{rB} &= A \Psi_{RB} L_s - A \Psi_{SB} L_{SR} - A_1 \Psi_{fB} L_{Sf}, \\ I_R &= \sqrt{I_{rA}^2 + I_{rB}^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Токи обмотки возбуждения I_f :

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

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:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_c}{dt} &= \omega_c, \\ \theta_c &= \theta_c - 2\pi \text{ а } \theta_c > 2\pi, \\ U_a &= U_m \sin(\theta_c), \\ U_b &= U_m \sin(\theta_c + 2\pi/3), \\ U_c &= U_m \sin(\theta_c - 2\pi/3). \end{aligned} \quad (9)$$

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 ψ_R и обмотки возбуждения ψ_f :

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

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

Уравнения ЭДС цепи статора в трехфазной системе:

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

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:

$$\begin{aligned} M_E &= \frac{3L_{SR}A(\psi_{Sa}\psi_{Rb} - \psi_{Sb}\psi_{Ra}) + 3L_{fS}A(\psi_{Sa}\psi_{Rb} - \psi_{Sb}\psi_{Ra})}{2}, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{M_E + M_H}{j}, \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega. \end{aligned} \quad (14)$$

Полученная модель является нелинейной за счет наличия перекрестных связей по моменту и 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. 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 ψ_s подтверждается результатами расчетов, приведенных на рисунках 1; 2 и 3, совпадающих с результатами, опубликованными в технической литературе.

На рис. 1 показаны графики переходных процессов момента M и частоты вращения ω 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_{Π} 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 .

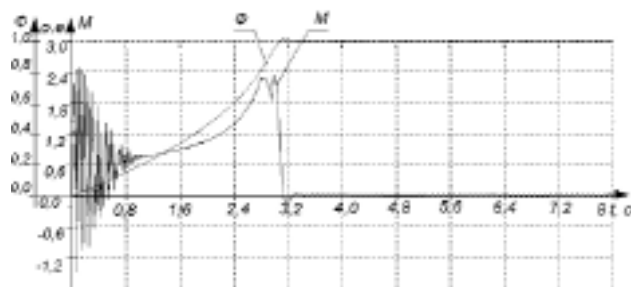


Рис. 1. Графики момента M и частоты вращения ω синхронного двигателя при прямом пуске

Согласно алгоритму пуска СЭД при достижении скорости вращения $\omega = 0,93 \cdot 14 = 282 \text{ с}^{-1}$ 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.

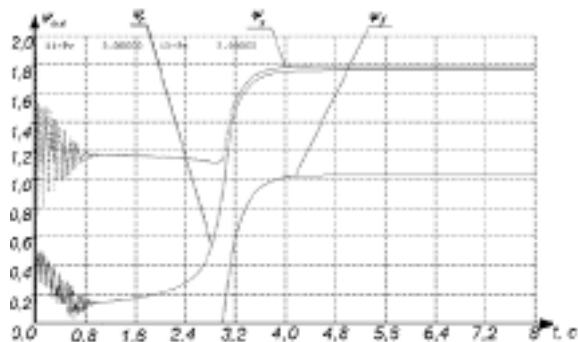


Рис. 2. Графики переходных процессов потокоцепления статора, ротора и возбуждения синхронного двигателя при прямом пуске

С момента времени $t \approx (1,0 \dots 1,2) \text{ с}$ по окончании колебаний до подачи возбуждения колебания электромагнитного момента M , ψ_s , ψ_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 ≈ 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:

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

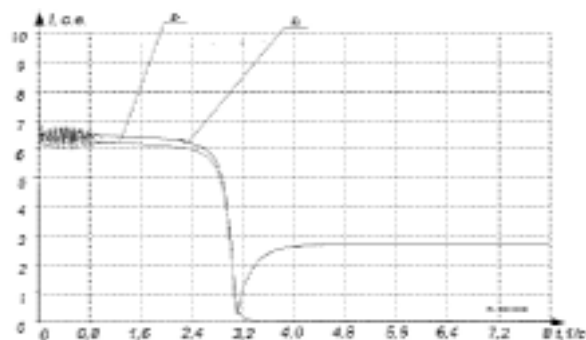


Рис. 3. Графики переходных процессов тока статора, ротора синхронного двигателя при прямом пуске

На рисунках 4; 5 и 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.

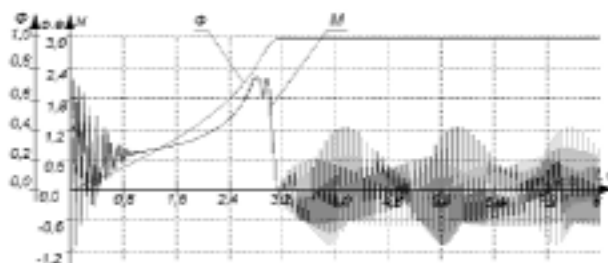


Рис. 4. Графики переходных процессов момента – M и частоты вращения ω синхронного двигателя при прямом пуске с учетом насыщения стали

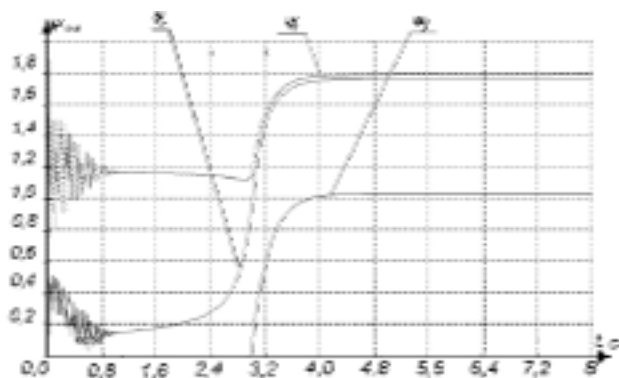


Рис. 5. Графики переходных процессов потокоцепления статора, ротора, возбуждения и частоты вращения ω синхронного двигателя при прямом пуске с учетом насыщения стали

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 % (рисунках 6 и 7).

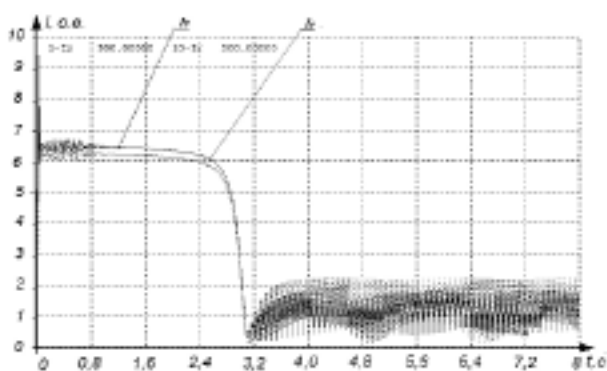


Рис. 6. Графики переходных процессов тока статора и ротора синхронного двигателя при прямом пуске с учетом насыщения стали

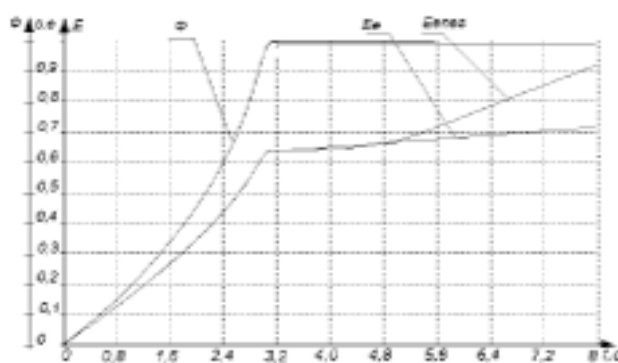


Рис. 7. Графики потребления электрической энергии при моделировании синхронного двигателя без учета – E_e и с учетом насыщения – E_{enas} стали

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.

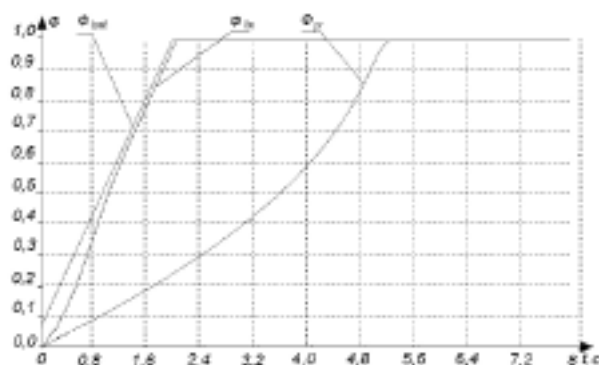


Рис. 8. Графики переходных процессов скорости вращения при линейном и ступенчатом задании скорости (прямом пуске)

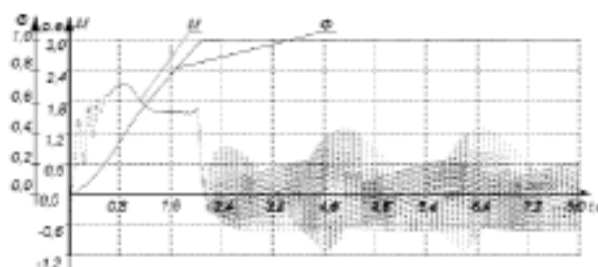


Рис. 9. Графики переходных процессов момента M и частоты вращения ω синхронного двигателя при плавном пуске с учетом насыщения стали

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 также не имеет высокочастотных составляющих (рис. 10) и ограничено насыщением стали.

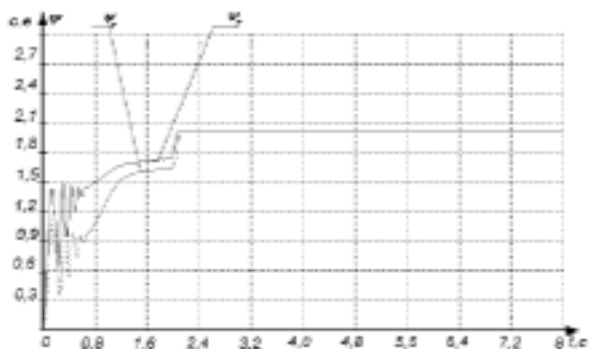


Рис. 10. Графики переходных процессов потокоцепления статора, ротора, возбуждения и частоты вращения ω синхронного двигателя при плавном пуске с учетом насыщения стали

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

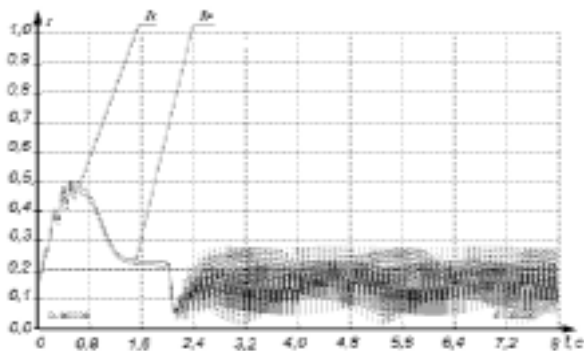


Рис. 11. Графики переходных процессов тока статора, ротора синхронного двигателя при плавном пуске с учетом насыщения стали

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.

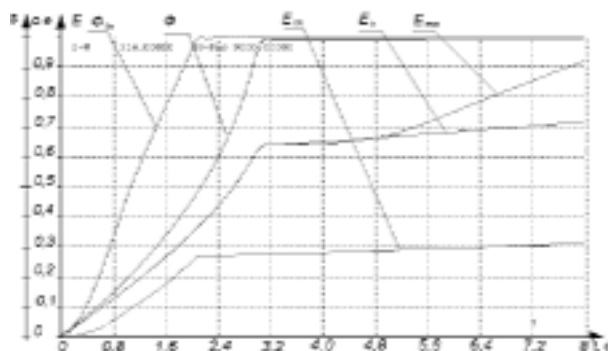


Рис. 12. Графики потребления электроэнергии при прямом пуске E_e , пуске с учетом насыщения E_{enas} и при линейном пуске E_{lin}

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. Синчук И. О. 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. Sinchuk I.O., (2008), 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 : –88 p. [in Russian].

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

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



Синчук
Олег Николаевич,
д-р техн. наук, проф.,
зав. каф. СПЭЭТ, ГВУЗ
Криворожского 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. транспортного ун-та.
Учебно-консультационный центр,
г. Кривой Рог



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