



УДК 62-83

**5.2. УЧЕТ МАГНИТНОЙ НЕСИММЕТРИИ
ЯВНОПОЛЮСНЫХ СИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**MAGNETIC ASYMMETRY ACCOUNT OF SALIENT-
POLE SYNCHRONOUS MOTORS IN
MATHEMATICAL SIMULATION**

Шрейнер Рудольф Теодорович, д-р. техн. наук, профессор-консультант каф. «Электрооборудование и энергоснабжение» Российского государственного профессионально-педагогического университета, Россия, 620012, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11. E-mail: r_shreiner@mail.ru

Поляков Владимир Николаевич, д-р. техн. наук, ст. науч. сотр., профессор каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.n.polyakov@urfu.ru

Медведев Алексей Владимирович, аспирант каф. «Электрооборудование и энергоснабжение» Российского государственного профессионально-педагогического университета, Россия, 620012, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11. E-mail: medalex@mail.ru

Rudolf T. Shreiner, Doctor Sc., Russian state vocational pedagogical university, 620012, Mashinostroiteley Street, 11, Ekaterinburg, Russia. E-mail: r_shreiner@mail.ru

Vladimir N. Polyakov, Doctor Sc., Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira Street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.n.polyakov@urfu.ru

Aleksey V. Medvedev, Graduate Stud., Russian state vocational pedagogical university, 620012, Mashinostroiteley Street, 11, Ekaterinburg, Russia. E-mail: medalex@mail.ru

Аннотация: Доклад посвящен учету магнитной несимметрии явнополюсных синхронных электродвигателей методом локальных сечений. Дается математическое описание разработанной версии метода, алгоритма и структуры его цифровой реализации. Приводятся результаты расчета нелинейной вектор-функции намагничивания машины по главному пути, пригодной для математического моделирования режимов явнополюсных синхронных машин и построения цифровых систем их регулирования.

Ключевые слова: синхронный явнополюсный двигатель; учет насыщения магнитной цепи; метод локальных характеристик намагничивания.

Abstract: The paper is devoted to issues of account magnetic asymmetry of salient-pole synchronous motors by the method of locale sections. Mathematical formulation of developed method version and digital implementation structures of it are given. Results of nonlinear magnetization vector-function on the main magnetic path calculation are presented. This vector-function is useful for both synchronous salient-pole motor mathematical simulation and digital control system design of it.

Key words: synchronous salient-pole motor, account of magnetic circuit saturation, method of locale magnetization characteristics.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитная несимметрия явнополюсных синхронных машин порождает определенные сложности при математическом описании нелинейных связей между векторами состояния их электромагнитных контуров [1,2]. Из числа известных методов учета нелинейных свойств насыщенных явнополюсных машин, наиболее точными являются методы, непосредственно

использующие векторные уравнения электромагнитного поля. Однако подобные методы требуют значительных вычислительных ресурсов, которые ограничены при реализации систем управления. Данное обстоятельство резко ограничивает их область применения. Менее точными, но сохраняющими основные качественные особенности насыщенных синхронных машин являются методы удельной магнитной проводимости эквивалентного

воздушного зазора [2], учета насыщения разделением магнитного потока [3]. Наиболее пригодными для построения систем регулирования явнополюсных синхронных машин представляются методы локальных кривых и усредненной характеристики намагничивания [4,5,6]. Данные методы сравнительно просты и вместе с тем обладают достаточной для практики точностью расчетов. Центральным вопросом разработки и использования подобных методов является рациональный выбор математического описания нелинейных характеристик намагничивания локальных контуров и учет различия их характеристик в различных локальных сечениях. Известны различные подходы к данному вопросу, в частности, использующие кусочно-гладкие функции для описания нелинейных характеристик локальных контуров при различных уровнях допущений [7,8]. Это не исчерпывает всех возможных вариантов решения вопроса.

Доклад посвящен развитию метода локальных сечений на основе уточненного математического описания нелинейных характеристик локальных контуров непрерывными функциями. Дается математическое описание предлагаемой версии метода, алгоритма и структуры его цифровой реализации. Приводятся результаты расчета и пример использования нелинейной вектор-функции намагничивания машины по главному пути, пригодной для математического моделирования режимов явнополюсных синхронных машин и построения цифровых систем их регулирования.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДА

На рис. 1 приведен цифровой алгоритм расчета вектор-функции намагничивания явнополюсной синхронной машины, реализованный в компьютерной программе. В качестве исходных данных в программу вводится информация об интегральных характеристиках намагничивания машины по продольной (d) и поперечной (q) осям. С учетом характера нелинейности кривых намагничивания и с позиций удобства их математического описания характеристики представляются в полиномиальной форме выражениями:

$$i_{md}(\psi_{md}) = \sum_{i=1}^k g_{i d} \psi_{md}^{2i-1}, \quad (1)$$

$$i_{mq}(\psi_{mq}) = \sum_{i=1}^k g_{i q} \psi_{mq}^{2i-1}, \quad (2)$$

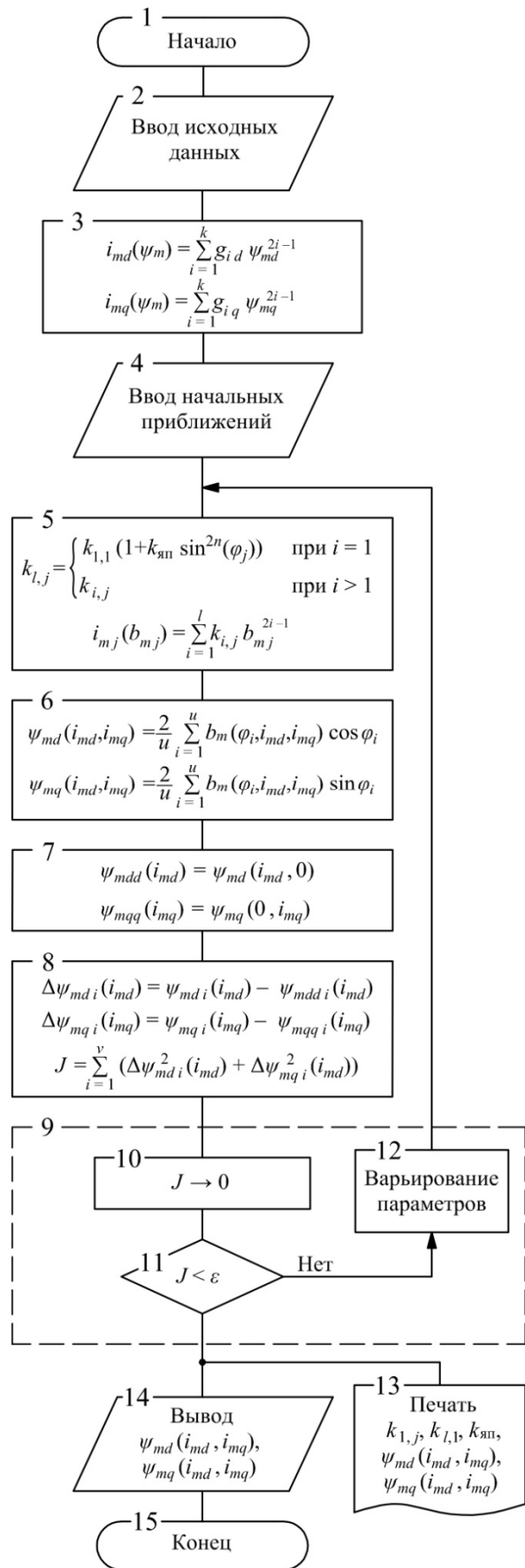


Рис. 1. Цифровой алгоритм расчета вектор-функции намагничивания

5. Моделирование систем электроприводов переменного тока

где i_{md} и i_{mq} — компоненты вектора результирующих токов намагничивания по осям d и q ;

ψ_{md} и ψ_{mq} — компоненты вектора главных потокоцеплений по соответствующим осям;

$g_{i,d}$, $g_{i,q}$ — коэффициенты полиномов.

Метод локальных сечений базируется на положении о том, что для каждого j -го сечения, расположенного под углом φ_j по отношению к продольной оси, существует локальная характеристика намагничивания, связывающая результирующий ток намагничивания i_{mj} и индукцию главного магнитного потока b_{mj} по данному сечению. Для математического описания этой связи в общем виде выбрана аналогичная формулам (1) и (2) полиномиальная форма:

$$i_{mj}(b_{mj}) = \sum_{i=1}^l k_{i,j} b_{mj}^{2i-1}, \quad j=1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Коэффициенты $k_{i,j}$ здесь рассматриваются как нелинейные функции угла локального сечения φ_j , конкретный вид которых определяется геометрией явнополюсной машины. Предлагается следующая рациональная форма описания коэффициентов этих функций в общем виде:

$$k_{i,j} = \begin{cases} k_{1,1} f(\varphi_j) & \text{при } i=1; \\ k_{i,1} & \text{при } i>1, \end{cases} \quad (4)$$

где $f(\varphi_j) = 1 + k_{яп} \sin^{2n}(\varphi_j)$.

В формуле (4) приняты следующие обозначения:

$k_{1,1}$ — коэффициент, имеющий смысл магнитного сопротивления линейного участка локального контура в случае совпадения локального сечения с продольной осью, т.е. при $\varphi_j = 0$ или $\varphi_j = \pi$;

$f(\varphi_j)$ — нелинейная функция угла локального сечения;

$$k_{яп} = \frac{k_{1\max} - k_{1,1}}{k_{1,1}} \quad \text{— коэффициент}$$

явнополюсности, представляющий собой относительную разность наибольшего (по оси q) и наименьшего (по оси d) магнитных сопротивлений линейных участков локальных контуров. В частном случае, для неявнополюсной машины $k_{яп} = 0$.

$n \geq 1$ — коэффициент формы, учитывающий соотношение ширины полюсного наконечника и полюсного деления.

Дальнейшие этапы программы заключаются в получении на этой основе расчетных интегральных характеристик намагничивания и

итерационное приближение этих характеристик к эталонным (заданным) путем подбора отмеченных выше параметров локальных характеристик намагничивания. Для этого необходимо предварительное обращение функции (3) численным решением нелинейного уравнения

$$\sum_{i=1}^l k_{i,j} b_{mj}^{2i-1} - i_{mj}(b_{mj}) = 0. \quad (5)$$

В результате обращения (5) и использования формы (4) формируется трехмерный массив значений магнитной индукции в локальных сечениях φ_j при различных значениях компонент i_{md} и i_{mq} вектора токов намагничивания:

$$b_{mj} = f(\varphi_j, i_{md}, i_{mq}). \quad (6)$$

При этом компоненты i_{md} и i_{mq} рассматриваются как периодические функции угла поворота вектора результирующих токов намагничивания относительно продольной оси на углы $v_{Imj} = \varphi_j$:

$$\begin{aligned} i_{md} &= i_m \cos \varphi_j; \\ i_{mq} &= i_m \sin \varphi_j, \end{aligned} \quad (7)$$

где i_m — модуль вектора результирующих токов намагничивания.

На рис. 2 приведено семейство графиков пространственного распределения магнитной индукции b_{mj} в различных локальных сечениях при фиксированном значении модуля вектора токов намагничивания и вариации его угла поворота v_{Im} относительно продольной оси ($\Delta = \pi/18$).

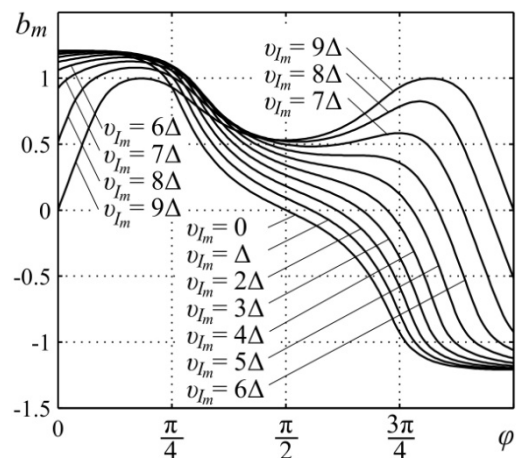


Рис. 2. Графики распределения магнитной индукции в локальных сечениях

Как известно [4], пространственная волна $b_m(\varphi)$ явнополюсной насыщенной машины представляет

собой кососимметричную кривую. Для данных кривых коэффициенты ряда Фурье численно равны значениям пространственных гармоник магнитной индукции в зазоре на продольной (d) и поперечной (q) осях машины. Разлагая функции $b_m(\varphi_j)$ в тригонометрические ряды, выделяя в них основные пространственные гармоники и интегрируя их в пределах полюсных делений обмоток эквивалентной двухфазной машины, получаем составляющие вектора главных потокоцеплений обмоток по осям d и q как функции переменных i_{md} и i_{mq} :

$$\begin{aligned} \psi_{md}(i_{md}, i_{mq}) &= \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} b_m(\varphi, i_{md}, i_{mq}) \cos \varphi d\varphi; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \psi_{mq}(i_{md}, i_{mq}) &= \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} b_m(\varphi, i_{md}, i_{mq}) \sin \varphi d\varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

Направив вектор токов намагничивания по оси d ($i_{md} = i_m, i_{mq} = 0$), из формулы (8) получаем уравнение интегральной характеристики намагничивания по оси d . Полагая $i_{md} = 0, i_{mq} = i_m$, из формулы (9) получаем уравнение интегральной характеристики намагничивания по оси q :

$$\psi_{mdd}(i_{md}) = \psi_{md}(i_{md}, 0); \quad (10)$$

$$\psi_{mqq}(i_{mq}) = \psi_{mq}(0, i_{mq}). \quad (11)$$

Метод локальных сечений предусматривает итерационный подбор параметров локальных характеристик по критерию минимизации целевой функции:

$$\begin{aligned} J = & \int_0^{i_{md, \max}} \Delta \psi_{md}^2(i_{md}) di_{md} + \\ & + \int_0^{i_{mq, \max}} \Delta \psi_{mq}^2(i_{mq}) di_{mq}. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь $\Delta \psi_{md}(i_{md}) = \psi_{md}(i_{md}) - \psi_{mdd}(i_{md})$ — невязка потокоцеплений по продольной оси;

$\Delta \psi_{mq}(i_{mq}) = \psi_{mq}(i_{mq}) - \psi_{mqq}(i_{mq})$ — невязка потокоцеплений по поперечной оси.

Для вычисления целевой функции оказывается необходимым предварительное представление эталонных потокоцеплений как функций токов

намагничивания, т.е. обращение функций (1) и (2), описывающих эталонные кривые намагничивания. Для этого используется численное решение уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k g_{id} \psi_{md}^{2i-1} - i_{md}(\psi_{md}) &= 0; \\ \sum_{i=1}^k g_{iq} \psi_{mq}^{2i-1} - i_{mq}(\psi_{mq}) &= 0. \end{aligned}$$

Результатом обращения эталонных кривых намагничивания являются зависимости $\psi_{md}(i_{md})$ и $\psi_{mq}(i_{mq})$. Для обеспечения соответствия полученных интегральных характеристик (10) и (11) эталонным предусматривается алгоритм поиска экстремума целевой функции (12), т.е. решение экстремальной задачи

$$J \rightarrow 0 \quad (13)$$

путем подбора параметров локальных характеристик намагничивания. В результате решения задачи (13) определяются значения коэффициентов полинома локальных кривых намагничивания $k_{i,j}$, обеспечивающих соответствие полученных интегральных характеристик (10) и (11) эталонным.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования показали, прежде всего, хорошее качественное совпадение расчетных характеристик с известными данными экспериментального исследования режимов и характеристик явнополюсных синхронных машин.

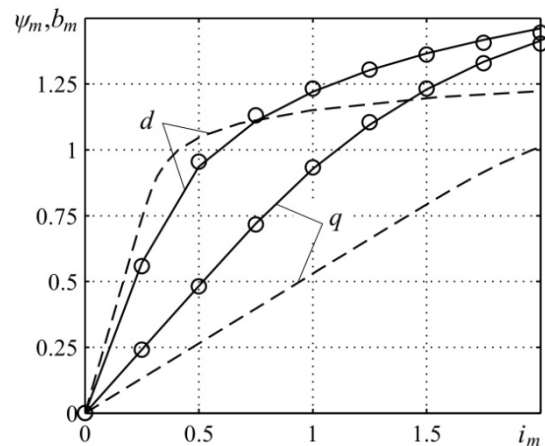


Рис. 3. Графики интегральных эталонных, интегральных расчетных и локальных кривых намагничивания по осям d и q

Решение экстремальной задачи иллюстрируется графиками рис. 3, где итерационный подбор параметров локальных характеристик (показаны

пунктиром) обеспечил соответствие расчетных интегральных характеристик намагничивания по осям d и q (показаны сплошными линиями) исходным данным, отмеченным маркером.

Изложенная версия метода локальных сечений подтверждает также известное положение о том, что в явнополюсной машине векторы токов намагничивания и главных потокоцепления в общем случае не совпадают по направлению. Более того, полученные и приведенные на рис. 4 графики показывают, что разность углов этих векторов зависит как от угла поворота вектора результирующих токов намагничивания ν_{Im} , так и от его модуля, причем с увеличением i_m различие углов уменьшается.

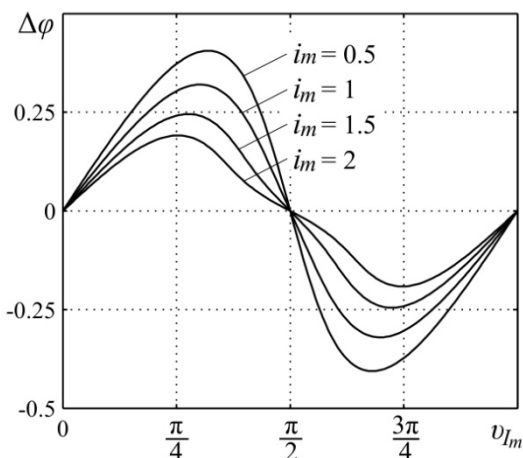


Рис. 4. Графики зависимостей разности углов векторов токов намагничивания и потокоцеплений от угла вектора токов намагничивания при вариации его модуля

Конечным результатом процедуры являются интегральные характеристики намагничивания $\Psi_{md}(i_{md}, i_{mq})$ и $\Psi_{mq}(i_{md}, i_{mq})$, определяющие координаты вектора главных потокоцеплений явнополюсной машины в зависимости от координат вектора результирующих токов намагничивания при вариациях его модуля и направления. Представление данной интегральной вектор-функции намагничивания машины в ортогональной системе координат позволяет учесть взаимовлияние процессов по продольной и поперечной осям машины. Это иллюстрируется результатами расчета, приведенными на рис. 5 и рис. 6. Как видно, увеличение составляющей тока намагничивания по любой из осей вызывает увеличение составляющей главного потокоцепления по данной оси и снижение составляющей главного потокоцепления по ортогональной оси.

На рис. 7 представлен пример использования полученной вектор-функции намагничивания при построении математической модели насыщенного

явнополюсного синхронного электродвигателя с продольным электромагнитным возбуждением без демпферной клетки [5]. Здесь нелинейный блок намагничивания выделен двойной рамкой.

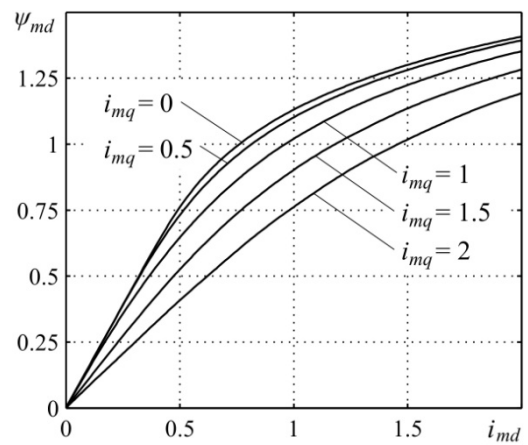


Рис. 5. Графики зависимостей главного потокоцепления от тока намагничивания по продольной оси при вариации тока i_{mq}

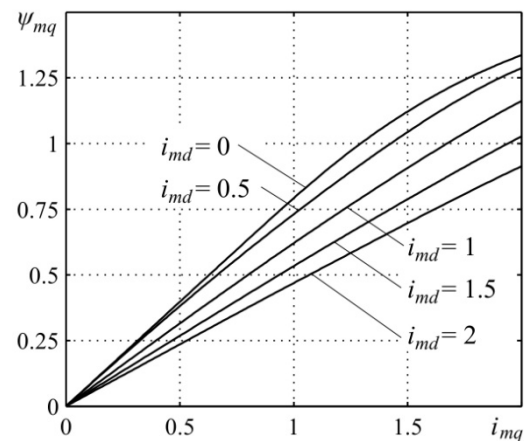


Рис. 6. Графики зависимостей главного потокоцепления от тока намагничивания по поперечной оси при вариации тока i_{md}

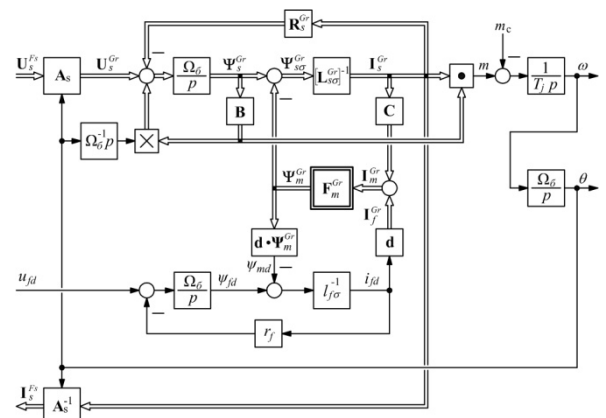


Рис. 7. Математическая модель явнополюсного синхронного электродвигателя с продольным электромагнитным возбуждением

На рис. 8 приведены результаты моделирования динамических режимов при пуске и набросе нагрузки мощного синхронного явнополюсного электродвигателя в векторной системе частотного управления.

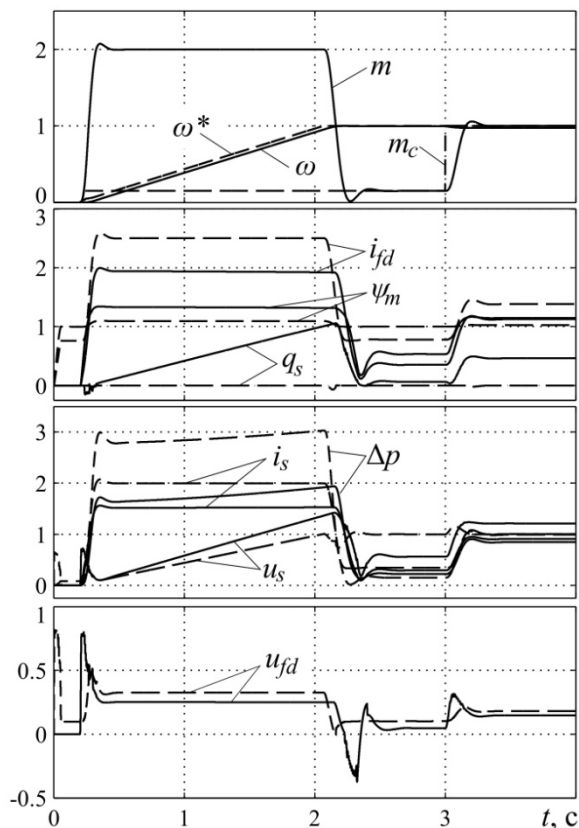


Рис. 8. Процессы пуска и наброса нагрузки синхронного явнополюсного электродвигателя при различных вариантах настройки векторной системы частотного управления

Прерывистыми линиями показаны графики реактивной мощности q_s , потерь Δp , модулей векторов главных потокосцеплений ψ_m , напряжений статора u_s и токов статора i_s , напряжения u_{fd} и тока возбуждения i_{fd} при настройке системы векторного управления на режим постоянства потокосцепления статора. Сплошными линиями показаны графики тех же переменных при настройке системы управления на режим минимизации потерь в двигателе при переменном главном магнитном потоке. При этом система управления обеспечивает инвариантность процессов изменения электромагнитного момента m и скорости ω двигателя по отношению к указанным выше вариантам настройки САР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше материалы дают основание для вывода о том, что представленная версия метода локальных сечений может быть использована при построении уточненных математических моделей явнополюсных машин, а также систем управления ими. Следует отметить, что расчет интегральной вектор-функции намагничивания методом локальных сечений требует больших затрат машинного времени. Однако представление конечных результатов в виде табличных функций оказывается удобным как при математическом моделировании, так и при реализации в микропроцессорных системах управления, поскольку не требует проведения повторных расчетов этих характеристик на каждом шаге интегрирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сипайлов Г.А. и др. Электрические машины (специальный курс) / Г.А. Сипайлов, Е.В. Кононенко, К.А. Хорьков – М.: Высш. шк., 1987. – 287 с.
2. Копылов И.П., Фрумин В.Л. Электромеханическое преобразование энергии в вентильных двигателях. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
3. Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
4. Ахматов М.Г. Синхронные машины. – М.: Высш. шк., 1984. – 135 с.
5. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», 2012. – 222 с.
6. Шутько В.Ф. Уравнения динамики электрических машин и методы их решения. – Екатеринбург: изд. ИПК УГТУ, 1999. – 155 с.
7. Ahmed El-Serafi M., Kar N.C. Methods for determining the intermediate-axis saturation characteristics of salient-pole synchronous machines from the measured d-axis characteristics, IEEE Trans. Energy conversion, Vol. 20, No. 1, pp. 88-97, 2005.
8. Narayan C. Kar and Ahmed M. El-Serafi A new model for the saturated synchronous machines using the intermediate-axis saturation characteristics, Proceedings of the 2002 IEEE Canadian conference on electrical and computer engineering, Vol.1, pp. 172-177, 2002.