



УДК 62-83:621.313.323

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

MATHEMATICAL SIMULATION OF SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTORS IN VARIABLE-FREQUENCY DRIVE APPLICATIONS

Шрейнер Рудольф Теодорович, докт. техн. наук, профессор, заведующий сектором, ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», Россия, 620137, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 1-д. E-mail: r_shreiner@mail.ru

Шилин Сергей Иванович, канд. техн. наук, доц. 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: shilin@asc-ural.ru

Медведев Алексей Владимирович, инженер-проектировщик II кат., ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», Россия, 620137, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 1-д. E-mail: medalex@mail.ru

Rudolf T. Shreiner, Doctor Sc., Prof., Automated Systems and Complexes CJSC, 620137, Studencheskaya street, 1d, Yekaterinburg, Russia. E-mail: r_shreiner@mail.ru

Sergey I. Shilin, Cand. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Yekaterinburg, Russia. E-mail: shilin@asc-ural.ru

Alexey V. Medvedev, Design eng., Automated Systems and Complexes CJSC, 620137, Studencheskaya street, 1d, Yekaterinburg, Russia. E-mail: medalex@mail.ru

Аннотация: Доклад посвящен вопросам математического моделирования синхронного реактивного двигателя с учетом насыщения и взаимовлияния процессов по продольной и поперечной осям ротора. Дано краткое описание модифицированного метода локальных характеристик намагничивания, определяющего вектор-функцию намагничивания машины по главному пути с учетом отмеченных выше факторов. Приведены результаты математического моделирования пускового режима синхронного реактивного двигателя в составе частотно-регулируемого электропривода с векторной системой управления при настройке на различные законы управления. Полученная математическая модель пригодна для математического моделирования режимов синхронных реактивных машин и построения цифровых систем их управления.

Abstract: The paper is devoted to issues of mathematical simulation of synchronous reluctance motor with account of both saturation effect and mutual influence of processes in direct and quadrature axes of rotor. Brief modified method of locale magnetization characteristics description is given. It used for magnetization vector-function calculation with account of noted above effects. Mathematical simulation results of starting mode of synchronous reluctance motor in variable-frequency drive application with vector control system tuned to various control laws are given. Developed mathematical model of synchronous reluctance motor is valid for both mathematical simulations of synchronous reluctance machines modes and design digital control systems of it.

Ключевые слова: математическая модель; синхронный реактивный двигатель; насыщение; метод локальных характеристик намагничивания; частотно-регулируемый электропривод.

Key words: mathematical model; synchronous reluctance motor; saturation; method of locale magnetization characteristics; variable-frequency electric drive.

ВВЕДЕНИЕ

Применение реактивных синхронных двигателей в системах электропривода различных механизмов имеет давнюю историю [1]. Ранние конструкции таких двигателей просты, надежны, требуют простого управления, но характеризуются низким коэффициентом мощности (отношение кВт/кВА),

низким удельным значением и высокими пульсациями электромагнитного момента. Наличие пусковой короткозамкнутой обмотки ротора накладывало определенные ограничения на улучшение их рабочих характеристик. Развитие силовой электроники и появление полупроводниковых преобразователей частоты позволило реализовать частотное управление, и в

том числе, режимы частотного пуска и торможения двигателей переменного тока без использования пусковой обмотки. Это дало проектировщикам возможность вернуться к вопросам оптимального конструирования ротора реактивного синхронного двигателя. Исследования, проведенные в этом направлении, показали [2,3], что ключевым фактором улучшения характеристик двигателя является получение высокого значения коэффициента явнополюсности, определяемого отношением индуктивностей по продольной (L_d) и поперечной (L_q) осям ротора.

Значимым этапом развития теории и практики реактивных двигателей явилось создание двигателей с распределенной анизотропией ротора. Использование возможностей современных систем микропроцессорного цифрового частотного управления открыло направление улучшения статических и динамических характеристик электроприводов переменного тока на базе синхронных реактивных двигателей [4].

Вместе с тем, в настоящее время остаются недостаточно проработанными вопросы построения математических моделей реактивных синхронных двигателей с анизотропией ротора, методы расчета их рабочих характеристик и использования результатов математического моделирования при построении качественных систем управления. Данная работа посвящена рассмотрению отмеченных выше вопросов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Объектом математического моделирования является синхронный реактивный двигатель, состоящий из статора, идентичного статору асинхронного короткозамкнутого двигателя, и анизотропного ротора, который не содержит ни постоянных магнитов, ни обмотки возбуждения, ни короткозамкнутой обмотки. Управление данным двигателем осуществляется только со стороны статора.

При построении математических моделей синхронных двигателей и решении задач управления целесообразно использование вращающихся систем координат. В качестве ориентирующих систем могут использоваться векторы напряжений, токов, потокосцеплений обмоток, а также угол поворота ротора. Чаще всего при решении задач управления уравнения моделей синхронных двигателей записывается в системе координат Odq [4-8], жестко связанной с ротором двигателя.

Исходя из конструктивных особенностей данного двигателя, его математическая модель может быть

получена как частный случай модели синхронной машины с продольным электромагнитным возбуждением [9]. Исключив уравнение напряжений отсутствующей обмотки возбуждения, получаем:

$$\mathbf{U}_s^{Gr} = \mathbf{A}_s(\theta) \mathbf{U}_s^{Fs}; \quad (1)$$

$$\mathbf{U}_s^{Gr} = \Omega_6^{-1} p \Psi_s^{Gr} + \omega \mathbf{B} \Psi_s^{Gr} + \mathbf{R}_s^{Gr} \mathbf{I}_s^{Gr}; \quad (2)$$

$$\Psi_s^{Gr} = \Psi_m^{Gr} + \mathbf{L}_{s\sigma}^{Gr} \mathbf{I}_s^{Gr}; \quad (3)$$

$$\mathbf{I}_m^{Gr} = \mathbf{I}_s^{Gr}; \quad (4)$$

$$\Psi_m^{Gr} = \mathbf{F}_m^{Gr} \mathbf{I}_m^{Gr}; \quad (5)$$

$$m = \mathbf{B} \Psi_s^{Gr} \bullet \mathbf{I}_s^{Gr}; \quad (6)$$

$$m - m_c = T_j p \omega; \quad (7)$$

$$\omega = \Omega_6^{-1} p \theta; \quad (8)$$

$$\mathbf{I}_s^{Fs} = \mathbf{A}_s^{-1}(\theta) \mathbf{I}_s^{Gr}, \quad (9)$$

где $\mathbf{A}_s(\theta)$ и $\mathbf{A}_s^{-1}(\theta)$ – матрицы прямого и обратного преобразований координат;

$\mathbf{U}_s^{Fs} = [u_{sa} \ u_{sb} \ u_{sc}]^T$, $\mathbf{I}_s^{Fs} = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$ – векторы фазных напряжений и токов;

$\mathbf{U}_s^{Gr} = [u_{sd} \ u_{sq}]^T$, $\mathbf{I}_s^{Gr} = [i_{sd} \ i_{sq}]^T$,

$\Psi_s^{Gr} = [\psi_{sd} \ \psi_{sq}]^T$ – векторы напряжений, токов и потокосцеплений обмотки якоря в системе координат ротора; $\mathbf{R}_s^{Gr} = \text{diag} [r_s \ r_s]$,

$\mathbf{L}_{s\sigma}^{Gr} = \text{diag} [l_{s\sigma} \ l_{s\sigma}]$ – матрицы активных сопротивлений и индуктивностей обмотки статора; $\Psi_m^{Gr} = [\psi_{md} \ \psi_{mq}]^T$, $\mathbf{I}_m^{Gr} = [i_{md} \ i_{mq}]^T$

– векторы главных потокосцеплений и результирующих намагничивающих токов в системе координат ротора; \mathbf{F}_m^{Gr} – вектор-функция, описывающая нелинейную связь между векторами главных потокосцеплений и результирующих токов намагничивания; T – символ транспонирования; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ – матричный

коэффициент; θ – угол поворота вала двигателя; ω – угловая скорость вращения ротора; m и m_c – электромагнитный момент и момент статического сопротивления; p – оператор дифференцирования по времени; T_j – механическая постоянная времени; $\Omega_6 = 2\pi f_N$ – базовое значение частоты.

На рис. 1 приведена структурная схема математической модели синхронного реактивного двигателя, соответствующая уравнениям (1)-(9).

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма поиска коэффициентов $k_{i,j}$. Рассмотрим содержание каждого блока.

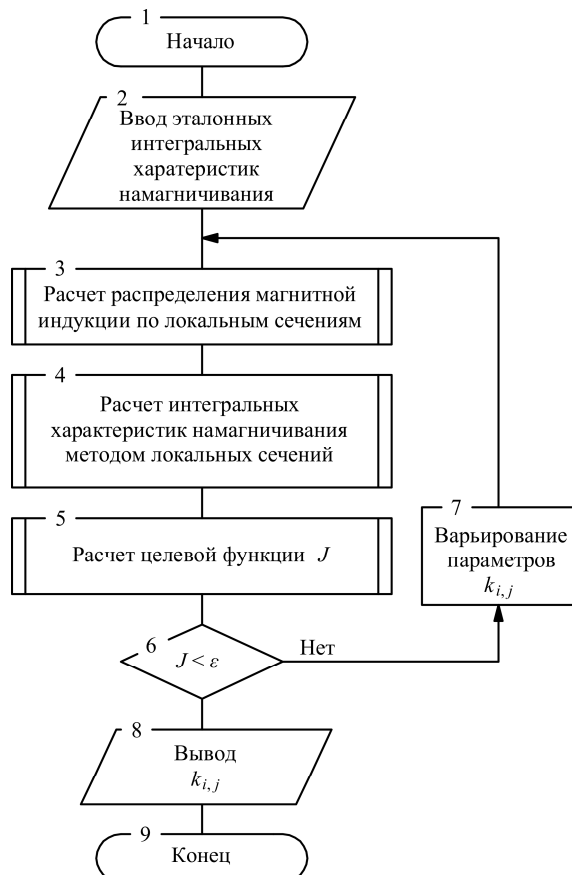


Рис. 3. Блок-схема алгоритма поиска коэффициентов

В качестве исходной информации в блоке 2 вводятся частные интегральные характеристики по соответствующим осям ротора:

$$\Psi_{md}^* = f(i_{md}); \Psi_{mq}^* = f(i_{mq}). \quad (14)$$

В блоке 3 производится расчет магнитной индукции (10) как функции трех переменных: угла локального сечения φ_j и координат вектора тока намагничивания. В блоке 4 производится интегрирование основных гармоник в пределах полюсных делений обмоток эквивалентной двухфазной машины для расчета вектора главных потокоосцеплений в координатах ротора как функции вектора токов намагничивания. В блоке 5 производится расчет квадратичной функции ошибки J между эталонными и полученными в блоке 4 главными потокоосцеплениями. В случае допустимого отклонения расчетных характеристик от эталонных ($J \leq \epsilon$), производится расчет вектор-функции главных потокоосцеплений (11), (12) при изменении модуля вектора тока намагничивания и его направления во всем диапазоне.

На рис. 4 и рис. 5 приведены результаты расчета интегральных характеристик (11) и (12) соответственно в зависимости от координат вектора результирующих токов намагничивания при вариациях его модуля и направления, полученные модифицированным методом локальных сечений.

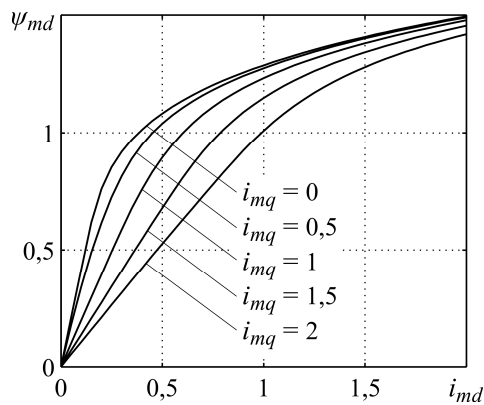


Рис. 4. Графики зависимостей главного потокоосцепления от тока намагничивания по продольной оси при вариации тока i_{mq}

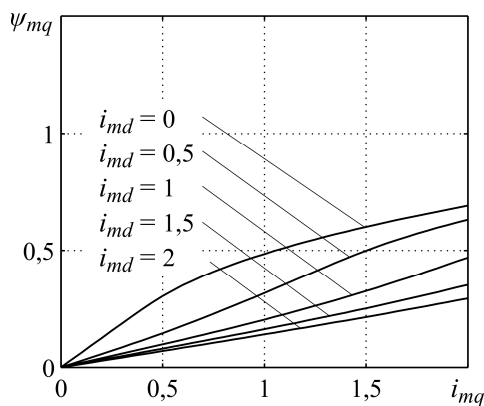


Рис. 5. Графики зависимостей главного потокоосцепления от тока намагничивания по поперечной оси при вариации тока i_{md}

Видно, что увеличение составляющей тока намагничивания по любой из осей вызывает увеличение составляющей главного потокоосцепления по данной оси и снижение составляющей главного потокоосцепления по ортогональной оси.

Двумерные зависимости (11) и (12) в табличной форме закладываются в нелинейный блок F_m^{Gr} в составе модели двигателя.

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Объектом моделирования является частотно-регулируемый синхронный реактивный электропривод, функциональная схема которого приведена на рис. 6.

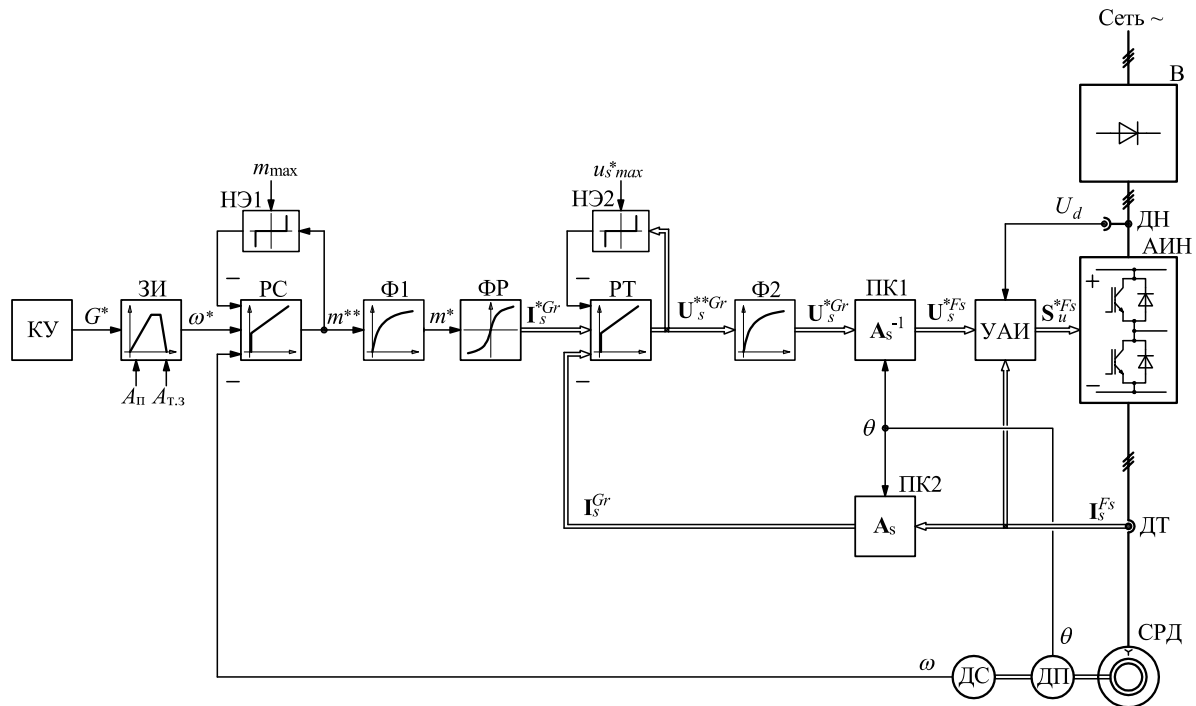


Рис. 6. Функциональная схема синхронного реактивного электропривода

Силовая часть состоит из синхронного реактивного двигателя, обмотка статора которого получает питание от полупроводникового преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока, состоящим из неуправляемого выпрямителя (В) и трехфазного мостового автономного инвертора напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Система управления построена по принципу подчиненного регулирования переменных с последовательной коррекцией [5], в состав которой входят двухмерная САР токов и замкнутая САР угловой скорости двигателя.

В системе управления электроприводом предусмотрены датчик напряжения в звене постоянного тока ДН, датчики фазных токов статора ДТ, угловой скорости вращения ДС и углового положения ротора ДП. Возможен также и бездатчиковый вариант построения системы управления.

Регулирование токов статора осуществляется во вращающейся системе координат, ориентированной по угловому положению ротора. С этой целью в канале обратной связи по фазным токам предусмотрен блок прямого преобразования координат ПК2, а прямом тракте — блок обратного преобразования координат вектора напряжения статора ПК1. В блок формирования режимов (ФР) в виде табличных функций вводятся оптимальные зависимости токов якоря по продольной (i_{sd}) и поперечной (i_{sq}) осям, соответствующие выбранному закону частотного управления.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 7 и рис. 8 приведены результаты математического моделирования динамических режимов пуска и наброса нагрузки на валу синхронного реактивного электродвигателя, полученные при настройке векторной системы на различные законы частотного управления.

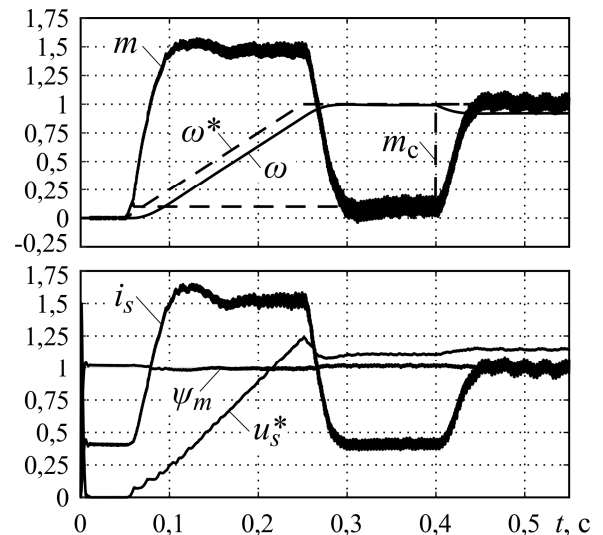


Рис. 7. Процессы пуска и наброса нагрузки на валу синхронного реактивного электродвигателя при управлении с постоянством главного потокоцепления

Параметры регуляторов системы управления соответствуют настройкам локальных контуров на модульный оптимум. Полоса пропускания САР

скорости с пропорциональным регулятором составляет 100 c^{-1} .

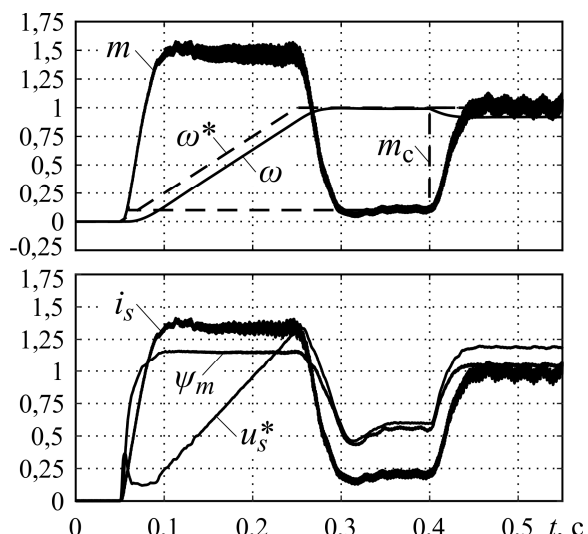


Рис. 8. Процессы пуска и наброса нагрузки на валу синхронного реактивного электродвигателя при управлении по минимуму тока статора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты математического моделирования синхронного реактивного электропривода при настройке векторной системы на разные законы частотного управления. Модель синхронного реактивного двигателя разработана на основе модифицированного метода локальных сечений и позволяет учитывать факторы магнитной анизотропии и насыщения при решении задач математического моделирования.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о пригодности математической модели для построения высококачественных векторных систем частотного управления, реализующих различные законы управления. Однако неотъемлемым этапом верификации модели является эксперимент.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lipo, T.A. Synchronous Reluctance Machines – a Viable Alternative for AC Drives / T.A. Lipo // *Electric Mach. and Power Syst.* 1991. P. 659-671.
2. Matsuo, T. Rotor design optimization of synchronous reluctance machine / Matsuo T., Lipo, T.A. // *IEEE Tran. Energy Conversion*, vol. 9, No. 2, 1994. P. 359-365.
3. Rizk, J. Optimum Design Parameters for Synchronous Motors / J. Rizk, M.H. Nagrial, A. Hellany // *Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference*. Egypt. 2010. P. 813-818.
4. Daud A. DSP Based Simulator for Speed Control of the Synchronous Reluctance Motor Using

Hysteresis Current Controller / A. Daud, B. Alsayid // *Energy and Power Eng.* 2013, Vol. 5. P. 363-371.

5. Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
6. Шрейнер Р.Т., Поляков В.Н., Медведев А.В. Математическое моделирование явнополюсных синхронных двигателей с автоматическим подбором параметров локальных характеристик намагничивания // *Электричество*. 2016. № 2. С. 57-64.
7. Field Oriented Control of Synchronous Reluctance Machine: Research Report: 93-23 / T.A. Lipo, T. Matsuo // Dept. of Electrical and Computer Engineering University of Wisconsin-Madison. Madison, 1993. P. 8.
8. Xu, L. Vector Control of Synchronous Reluctance Motor Including Saturation and Iron Los / L. Xu, X. Xu, D.W. Novotny, T.A. Lipo // *IEEE-IAS Conference Record*. 1990. Vol. 1. P. 359-364.
9. Поляков В.Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО РГППУ, 2012. 222 с.
10. Оганян Р.В. Поле в воздушном зазоре явнополюсной синхронной машины при насыщении магнитопровода // *Электротехника*. 1966. №8. С. 9-12.
11. Ахматов М.Г. Синхронные машины. М: Высшая школа, 1984. 135 с.
12. Kar, N.C. A new model for the saturated synchronous machines using the intermediate-axis saturation characteristics / N.C. Kar, A.M. El-Serafi // *Proceedings of the 2002 IEEE Canadian conference on electrical and computer engineering*. 2002. Vol.1. P. 172-177.
13. deMello, F.P. Representation of saturation in synchronous machines / F.P. deMello, L.N. Hannett // *IEEE Trans. Power Syst.* 1986. Vol.1, №1. P. 8-18.
14. Levi, E. Saturation modeling in d-q axis models of salient-pole synchronous machines / E. Levi // *IEEE Trans. Energy Convers.* 1999. Vol.14, №1. P. 44-50.
15. El-Serafi, M. Saturation representation in synchronous machine models / M. El-Serafi, J. Wu // *Electric Mach. and Power Syst.* 1992. Vol.20, №4 P. 355-369.
16. Шрейнер Р.Т. Учет магнитной несимметрии явнополюсных синхронных электродвигателей в задачах математического моделирования / Р.Т. Шрейнер, В.Н. Поляков, А.В. Медведев. // *Электроприводы переменного тока: Труды международной шестнадцатой научно-технической конференции 05-09 октября 2015*. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2015. С. 119-124.
17. Сидоров О.Ю. Методы конечных элементов и конечных разностей в электромеханике и электротехнологии / О.Ю. Сидоров, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов. М.: Энергоатомиздат, 2010. 331 с.