

\* \* \*

*Электричество, 2016, № 2, с. 57–64.*

## **Математическое моделирование явнополюсных синхронных двигателей с автоматическим подбором параметров локальных характеристик намагничивания**

**ШРЕЙНЕР Р.Т., ПОЛЯКОВ В.Н., МЕДВЕДЕВ А.В.**

*Цель работы – создание математической модели двигателя, пригодной для аналитических расчетов и построения систем управления электроприводами с явнополюсными синхронными двигателями. Для этого модифицирован метод локальных характеристик намагничивания дополнением его процедурой автоматического подбора параметров. Разработан цифровой алгоритм расчета интегральных характеристик намагничивания, предназначенный для уточненного математического моделирования явнополюсных синхронных двигателей. Приведены графики распределения магнитной индукции в локальных сечениях и интегральных характеристик намагничивания, подтверждающие возможность учета насыщения и взаимовлияния процессов по ортогональным осям. Представлены результаты моделирования динамических режимов явнополюсного синхронного электродвигателя в системе векторного управления, построенной на основе полученных интегральных вектор-функций намагничивания.*

**Ключевые слова:** синхронный явнополюсный двигатель, моделирование, учет насыщения магнитной цепи, метод локальных характеристик намагничивания, автоматический подбор параметров

В процессе развития силовой полупроводниковой техники и микропроцессорных средств управления создана основа для разработки и внедрения конкурентоспособных частотно-регулируемых электроприводов переменного тока с синхронными электродвигателями. Общепринятым этапом разработки современных электроприводов является математическое моделирование. Математическая модель служит эффективным инструментом анализа свойств двигателя, основой для синтеза структуры модели системы управления и ее реализации на базе микропроцессорной техники в составе системы реального времени [1–3].

Синхронный двигатель как объект управления является более сложным по сравнению с асинхронным короткозамкнутым двигателем. Поэтому при создании частотно-регулируемых синхронных электроприводов переменного тока с прогнозируемыми характеристиками роль математического моделирования возрастает.

Наиболее полно разработаны математические модели неявнополюсных синхронных двигателей как объектов частотного управления, а также структуры качественных систем векторного управления с подчиненным регулированием координат и оптимизации режимов работы двигателей с учетом насыщения [2, 3]. Математическое описание явнополюсных синхронных двигателей является более сложной проблемой в связи с необходимостью учета магнитной асимметрии [4–9 и др.] в рамках решения задачи учета насыщения.

Существуют различные подходы к расчету магнитных цепей электрических машин, характеризующиеся разными степенями идеализации [10–14]. Наиболее точными являются методы, непосредственно использующие векторные уравнения электромагнитного поля [15]. Однако современный уровень развития встраиваемых микропроцессорных систем управления не позволяет использовать эти методы в системах реального времени.

В связи с этим практический интерес представляют приближенные методы, такие как метод детализированных схем замещения [16], метод усредненной характеристики намагничивания [6] и методы локальных кривых [3–5, 10, 17, 18]. С позиций обеспечения отмеченных выше сфер применения математических моделей при создании систем управления электроприводами наибольший интерес представляет метод локальных характеристик намагничивания, сочетающий в себе относительную простоту и наглядную физическую интерпретацию.

Особенностью метода локальных характеристик является анализ магнитного поля в поперечном се-

чении машины на основе понятий локальных и интегральных характеристик намагничивания. Локальные характеристики описывают магнитные свойства семейства элементарных контуров, расположенных под различными углами по отношению к продольной оси ротора машины. Каждая характеристика представляет зависимость магнитной индукции  $b_{mi}$  от тока намагничивания  $i_{mi}$  для  $i$ -го элементарного контура:

$$b_{mi} = f_i(i_{mi}), \quad (1)$$

где  $i_{mi} = i_{md} \cos j_i + i_{mq} \sin j_i$ ;  $j_i$  – угол  $i$ -го элементарного контура, отсчитываемый от продольной оси.

Интегрирование локальных характеристик намагничивания в пределах полюсных делений обмоток машины позволяет получить ее интегральные характеристики в виде зависимостей главных потокоцеплений ( $y_{md}$  и  $y_{mq}$ ) от результирующих токов намагничивания ( $i_{md}$  и  $i_{mq}$ ) по продольной и поперечной осям:

$$y_{md} = f_d(i_{md}, i_{mq}); \quad y_{mq} = f_q(i_{md}, i_{mq}). \quad (2)$$

Математическое представление потокоцеплений как функции двух переменных позволяет учесть взаимовлияние процессов по ортогональным осям.

Заметим, что функции (2) возможно определить, располагая лишь информацией о локальных характеристиках намагничивания, полученной в результате детализированного расчета картины магнитного поля в поперечном сечении машины [4, 5, 19]. Альтернативный вариант получения зависимостей (2) требует экспериментального исследования характеристик машины. Из анализа технической документации на двигатели [20] можно определить интегральные характеристики намагничивания по продольной и поперечной осям, снятые при следующих условиях:

$$y_{md}^* = f(i_{md}, i_{mq}) \Big|_{i_{mq}=0}; \quad y_{mq}^* = f(i_{md}, i_{mq}) \Big|_{i_{md}=0}. \quad (3)$$

Характеристики (3) не позволяют найти значения потокоцеплений с учетом взаимовлияния при действии МДС одновременно по обеим осям и по сути являются частными. Отмеченные обстоятельства являются основным препятствием при построении моделей, пригодных для разработки и реализации качественных систем управления синхронными двигателями.

В статье излагается процедура построения математической модели явнополюсного синхронного двигателя, которая позволяет на основе анализа частных интегральных характеристик (3), примене-

ния метода локальных сечений и автоматического подбора параметров локальных характеристик намагничивания получить взаимозависимые интегральные характеристики (2), учитывающие взаимодействие процессов намагничивания машины по продольной и поперечной осям. Блок-схема цифрового алгоритма расчета интегральных характеристик приведена на рис. 1.

В блоке 2 в качестве исходной информации вводятся в табличной форме частные интегральные характеристики двигателя по продольной и поперечной осям вида (3).

В блоке 3 введенные данные аппроксимируются гладкими аналитическими функциями вида:

$$i_{md}(y_{md}) = \sum_{i=1}^k \hat{a}_{di} y_{md}^{2i-1}; \quad (4)$$

$$i_{mq}(y_{mq}) = \sum_{i=1}^k \hat{a}_{qi} y_{mq}^{2i-1},$$

где  $g_{di}, g_{qi}$  – коэффициенты полиномов.

Выбор нечетных степеней полиномов обеспечивает симметрию характеристик относительно начала координат.

В блоке 4 конструируется математическая модель локальных характеристик намагничивания, описываемых в общем виде аналитическими функциями с переменными параметрами  $k_{i,j}$ :

$$i_{mj}(b_{mj}) = \sum_{i=1}^l \hat{a}_{i,j} k_{i,j} b_{mj}^{2i-1}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

где  $j$  – порядковый номер локального сечения.

Из соображений сокращения машинного времени на реализацию алгоритма подбора параметров локальных характеристик намагничивания и получения однозначного решения представляется целесообразным сведение числа варьируемых переменных к необходимому и достаточному минимуму. В связи с этим используется следующий частный случай выражения (5):

$$i_{mj}(b_{mj}) = k_{1,j} b_{mj} + k_{6,1} b_{mj}^{11}. \quad (6)$$

Как показано в [2], выражение (6) позволяет представить характеристику намагничивания машины с достаточной точностью.

Коэффициент  $k_{1,j}$  определяет наклон линейного участка характеристики намагничивания  $j$ -го локального контура в зависимости от значения воздушного зазора в данном сечении. Коэффициент  $k_{6,1}$  позволяет описывать нелинейный участок характеристики намагничивания, обусловленный насыщением ферромагнитных участков  $j$ -го локального контура. При описании изменения параметров характеристик локальных контуров будем учи-



Рис. 1. Алгоритм расчета вектор-функции намагничивания

тывать лишь изменение коэффициента  $k_{1,j}$ , который рассматривается как нелинейная периодическая функция двойного угла локального сечения  $j$  и математически представляется в виде

$$k_{1,j} = k_{1,1} (1 + k_{яп} \sin^{2n}(j \cdot j)), \quad (7)$$

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

$k_{яп} = \frac{k_{1,max} - k_{1,1}}{k_{1,1}}$  – коэффициент явнополюсности,

представляющий собой относительную разность наибольшего (по оси  $q$ ) и наименьшего (по оси  $d$ ) значений магнитных сопротивлений линейных участков локальных контуров (в частном случае для неявнополюсной машины  $k_{яп} = 0$ );  $n^3 - 1$  – коэффициент формы, учитывающий соотношение значений ширины полюсного наконечника и полюсного деления.

Приближение к реальному характеру изменения параметров локальных характеристик намагничивания обеспечивается за счет показателя степени тригонометрической функции и коэффициента явнополюсности. Коэффициенты  $k_{1,1}$ ,  $k_{6,1}$  и  $k_{яп}$  в последующей процедуре подбора локальных харак-

теристик рассматриваются как их варьируемые параметры.

В блоке 5 реализуется итерационная процедура подбора параметров  $k_{1,1}$ ,  $k_{6,1}$  и  $k_{яп}$ . На каждой итерации по начальным значениям параметров локальных характеристик вычисляются частные интегральные характеристики и сравниваются с эталонными. Для этого используются соответствующие методу локальных сечений математические выражения главных потокосцеплений как функций двух переменных:

$$y_{md}(i_{md}, i_{mq}) = \frac{2}{p} \int_0^p \dot{b}_m(j, i_{md}, i_{mq}) \cos j \, dj; \quad (8)$$

$$y_{mq}(i_{md}, i_{mq}) = \frac{2}{p} \int_0^p \dot{b}_m(j, i_{md}, i_{mq}) \sin j \, dj. \quad (9)$$

Функция  $b_m(j, i_{md}, i_{mq})$  определяется в результате обращения модели локальных характеристик намагничивания (6).

С учетом условий снятия частных эталонных характеристик намагничивания (3) для сравнения характеристик (8), (9) с эталонными находим соответствующие частные характеристики:

$$y_{md}(i_{md}) = \frac{2}{p} \int_0^p \dot{b}_m(j, i_{md}, i_{mq} = 0) \cos j \, dj; \quad (10)$$

$$y_{mq}(i_{mq}) = \frac{2}{p} \int_0^p \dot{b}_m(j, i_{md} = 0, i_{mq}) \sin j \, dj. \quad (11)$$

Параметры локальных характеристик  $k_{1,1}$ ,  $k_{6,1}$ ,  $k_{яп}$  подбираются в процессе решения задачи поиска минимума целевой функции

$$J = \int_0^{i_{md}^{max}} \text{Dy}_{md}^2(i_{md}) di_{md} + \int_0^{i_{mq}^{max}} \text{Dy}_{mq}^2(i_{mq}) di_{mq}, \quad (12)$$

где  $\text{Dy}_{md}(i_{md}) = \text{Dy}_{md}^*(i_{md}) - \text{Dy}_{md}(i_{md})$  – невязка потокосцеплений по оси  $d$ ;  $\text{Dy}_{mq}(i_{mq}) = \text{Dy}_{mq}^*(i_{mq}) - \text{Dy}_{mq}(i_{mq})$  – невязка потокосцеплений по оси  $q$ .

Параметры локальных характеристик намагничивания подбираются таким образом, чтобы полученные методом локальных характеристик интегральные характеристики (10), (11) соответствовали эталонным вида (3) с заданной точностью. В случае соответствия расчетных характеристик эталонным данная подпрограмма передает найденные значения параметров локальных характеристик в последующий блок. В противном случае значения коэффициентов изменяются в соответствии с выбранным методом многопараметрической оптимизации, и расчет повторяется заново.

Для поиска минимума используется симплекс-метод Нелдера-Мида, не требующий вычисления производных функции [21]. Поскольку в данном методе целевая функция вычисляется в каждой из вершин симплекса, то при конструировании математической модели (6) для уменьшения объема вычислений и упрощения алгоритма выбрано минимальное, но в то же время достаточное число варьируемых переменных.

В блоке 6 рассчитываются взаимозависимые интегральные характеристики намагничивания методом локальных характеристик намагничивания. При этом магнитная индукция  $b_m$  в локальных сечениях  $j$  при различных значениях составляющих  $i_{md}$  и  $i_{mq}$  вектора токов намагничивания определяется путем обращения функции (6) с использованием подобранных параметров локальных характеристик намагничивания и модели изменения магнитного сопротивления воздушного зазора вдоль расточки статора (7). Составляющие  $i_{md}$  и  $i_{mq}$  рассматриваются как периодические функции угла поворота вектора результирующих токов намагничивания относительно продольной оси на углы  $\alpha_{Imj} = j$ :

$$i_{md} = i_m \cos j; \quad i_{mq} = i_m \sin j. \quad (13)$$

Результат иллюстрируется приведенным на рис. 2 семейством графиков пространственного распределения магнитной индукции  $b_{mj}$  в различных локальных сечениях при фиксированном значении модуля вектора токов намагничивания и вариации его угла поворота  $\alpha_{Im}$  относительно продольной оси ( $D = p/18$ ). Как видно из рис. 2, пространственная волна  $b_m(j)$  явнополюсной насыщенной машины представляет собой кососимметричную кривую [10]. При разложении кривой в ряд Фурье коэффициенты основной гармоники численно равны значениям пространственных гармоник магнитной индукции в зазоре на продольной и поперечной осях машины. В соответствии с методом локальных характеристик намагничивания составляющие вектора главных потокосцеплений обмоток по продольной  $y_{md}$  и поперечной  $y_{mq}$  осям как функции двух переменных  $i_{md}$  и  $i_{mq}$  определяются по (8), (9).

Представление 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. 3, а и б. Как видно, увеличение составляющей тока намагничивания по любой из осей вызывает увеличение составляющей главного потокосцепления по данной оси и снижение со-

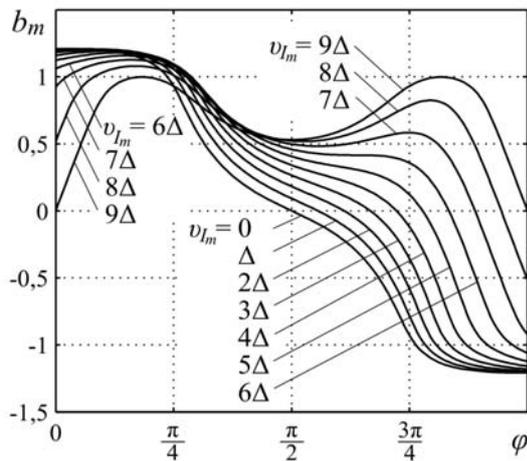


Рис. 2. Графики распределения магнитной индукции в локальных сечениях

ставляющей главного потокосцепления по ортогональной оси.

В блоке 7 полученные зависимости сохраняются. Табличная форма оказывается удобной при решении задач математического моделирования, оптимизации режимов и построении систем автоматического управления явнополюсных синхронных машин на основе микропроцессорной техники.

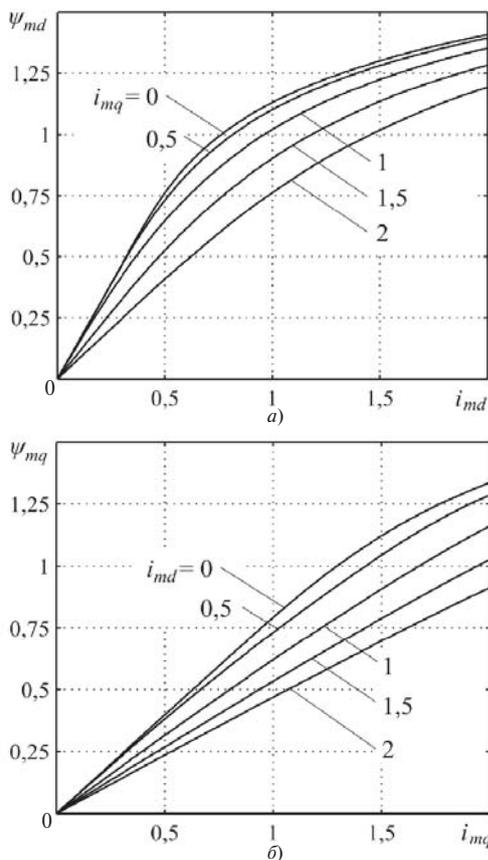


Рис. 3. Графики зависимостей компоненты главного потокосцепления от составляющей тока намагничивания по одноименной оси при вариации составляющей тока намагничивания по ортогональной оси

Для математического моделирования явнополюсных синхронных двигателей с продольным электромагнитным возбуждением без демпферной клетки может быть использована известная математическая модель [2, 3]:

$$\begin{aligned}
 U_s^{Gr} &= A_s(q)U_s^{Fs}; \\
 U_s^{Gr} &= W_6^{-1}pY_s^{Gr} + wBY_s^{Gr} + R_s^{Gr}I_s^{Gr}; \\
 U_f^{Gr} &= W_6^{-1}pY_f^{Gr} + R_f^{Gr}I_f^{Gr}; \\
 Y_f^{Gr} &= Y_m^{Gr} + L_{js}^{Gr}I_j^{Gr}, \quad j = s, f; \\
 Y_m^{Gr} &= F_m^{Gr}I_m^{Gr}; \\
 I_m^{Gr} &= CI_s^{Gr} + I_f^{Gr}; \\
 m &= BY_m^{Gr}I_s^{Gr}; \\
 m - m_c &= T_j p w; \\
 w &= W_6^{-1} p q; \\
 I_s^{Fs} &= A_s^{-1}(q)U_s^{Gr},
 \end{aligned}$$

фактор явнополюсности учитывается нелинейной вектор-функцией намагничивания:

$$F_m^{Gr}(I_m^{Gr}) = \frac{\partial y_{md}(i_{md}, i_{mq})}{\partial i_{mq}} \dot{u} \quad \frac{\partial y_{mq}(i_{md}, i_{mq})}{\partial i_{md}} \dot{u}$$

алгоритм расчета которой изложен в представленной работе.

При применении данной вектор-функции в составе систем реального времени для расчета значений главных потокосцеплений во всем диапазоне изменений модуля тока намагничивания и его угла применяется алгоритм линейной интерполяции.

На рис. 4 приведены результаты математического моделирования динамических режимов при пуске (интервал времени от 0,2 до 3 с) и набросе нагрузки  $m_N$  (при 3 с) мощного синхронного явнополюсного электродвигателя в векторной системе частотного управления. Режимы пуска и выхода в установившееся состояние характеризуются сравнительно небольшой форсировкой напряжений якоря  $u_s$  и возбуждения  $u_{fd}$ , которое обеспечивается применением задатчика интенсивности второго порядка. Параметры регуляторов системы управления соответствуют настройке локальных контуров на модульный оптимум. Полоса пропускания САР скорости с пропорциональным регулятором составляет  $18,5 \text{ с}^{-1}$ . Штриховыми линиями изображены временные зависимости для закона управления с постоянством потокосцепления обмотки якоря при ортогональности изображающих векторов потокосцеплений и токов якоря, а сплошными – для режима с переменным (оптимальным) главным маг-

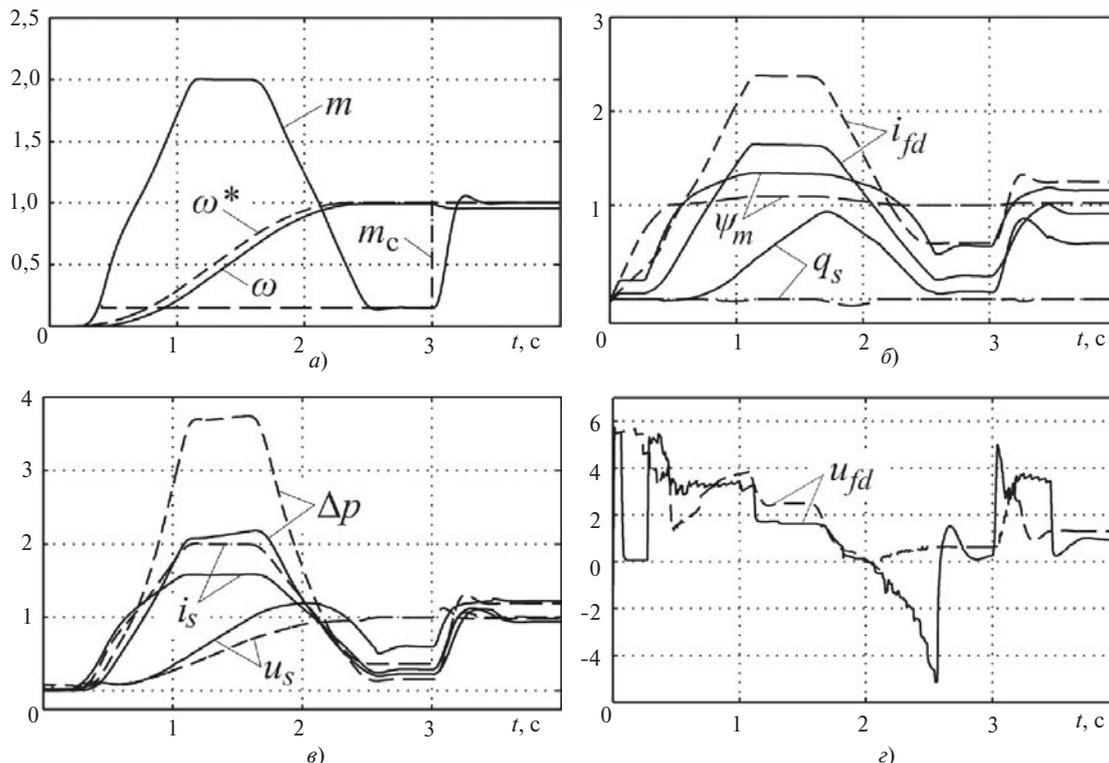


Рис. 4. Процессы пуска и наброса нагрузки синхронного явнополюсного электродвигателя при различных вариантах настройки векторной системы частотного управления

нитным потоком при минимуме суммарных потерь. При этом система управления обеспечивает инвариантность процессов изменения электромагнитного момента  $m$  и скорости  $\omega$  двигателя по отношению к указанным выше вариантам настройки САР. В то же время законы изменения во времени напряжений, токов, потокосцеплений и потерь оказываются различными.

Наибольшие различия наблюдаются на этапе разгона двигателя. Как видно из рис. 4, в режиме минимума суммарных потерь при переменном главном потоке наблюдается снижение суммарных потерь  $\Delta p$  на 43%, тока возбуждения  $i_{fd}$  на 30%, тока статора на 21%, что улучшает тепловой режим СД и в особенности нагрев обмотки возбуждения. Однако уменьшение токов статора и возбуждения сопровождается увеличением главного магнитного потока на 18%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков К.А. Электрические машины (специальный курс). — М.: Высшая школа, 1987, 287 с.
2. Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод. — М.: Энергоатомиздат, 1985, 224 с.
3. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока. — Екатеринбург: Изд. Российского государственного профессионально-педагогического университета, 2012, 222 с.
4. Фильц Р.В., Глухивский Л.И. Основные положения магнитно-нелинейной теории явнополюсной синхронной машины. — Электричество, 1970, № 6, с. 30–34.
5. Фильц Р.В., Глухивский Л.И. Основы магнитно-нелинейной теории обобщенной явнополюсной синхронной машины в фазных координатах. — Изв. вузов. Электромеханика, 1973, № 1, с. 17–28.
6. Оганян Р.В. Поле в воздушном зазоре явнополюсной синхронной машины при насыщении магнитопровода. — Электротехника, 1966, № 8, с. 9–12.
7. Рихтер Р. Электрические машины, т. 2. — ОНТИ НКТП СССР, 1936, 690 с.
8. Xie G., Ramshaw R.S. Nonlinear model of synchronous machine with saliency. — Trans. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1986, vol. EC-1, No. 3, pp. 198–203.
9. Беспалов В.Я., Мошинский Ю.А. О преобразовании системы дифференциальных уравнений электрических машин с электрической и магнитной асимметрией. — Электричество, 1984, № 1, с. 57.
10. Ахматов М.Г. Синхронные машины. — М.: Высшая школа, 1984, 135 с.
11. Kar N.C., El-Serafi A.M. 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, 2002, vol. 1, pp. 172–177.
12. De Mello F.P., Hannett L.N. Representation of saturation in synchronous machines. — IEEE Trans. Power Syst., 1986, vol.1, No. 1, pp. 8–18.
13. Levi E. Saturation modeling in d-q axis models of salient-pole synchronous machines. — IEEE Trans. Energy Convers., 1999, vol. 14, No. 1, pp. 44–50.
14. El-Serafi M., Wu J. Saturation representation in synchronous machine models. — Electric Mach. Power Syst., 1992, vol. 20, No. 4, pp. 355–369.
15. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. — М.: Энергия, 1969, 304 с.
16. Сидоров О.Ю., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф. Методы конечных элементов и конечных разностей в электромеханике и электротехнологии. — М.: Энергоатомиздат, 2010, 331 с.

17. **Шутько В.Ф.** Уравнения динамики электрических машин и методы их решения. — Екатеринбург: Изд. Уральского государственного технического университета, 1999, 155 с.
18. **Kar N.C., El-Serafi A.M.** Methods for determining the intermediate-axis saturation characteristics of salient-pole synchronous machines from the measured d-axis characteristics. — IEEE Trans. Energy conversion, 2005, vol. 20, No. 1, pp. 88–97.
19. **Постников И.М.** Проектирование электрических машин. — Киев: Изд-во Гостехлит, 1960.
20. **Filho E.R., Nunes F.L. Jr.** Synchronous machine field current calculation taking into account the magnetic saturation. — Sba Controle & Automação, 2002, vol. 13, No. 2, pp. 165–170.
21. **Химмельблау Д.** Прикладное нелинейное программирование. — М.: Мир, 1975, 534 с.

[21.09.15]

*А в т о р ы*: **Шрейнер Рудольф Теодорович** окончил в 1960 г. электротехнический факультет Уральского политехнического института. В 1991 г. защитил докторскую диссертацию «Асинхронные элект-

троприводы с полупроводниковыми преобразователями частоты». Профессор кафедры электрооборудования и энергоснабжения Российского государственного профессионально-педагогического университета (РГППУ).

**Поляков Владимир Николаевич** окончил в 1969 г. электротехнический факультет Уральского политехнического института. В 2009 г. защитил докторскую диссертацию «Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов». Профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета имени Б.Н. Ельцина.

**Медведев Алексей Владимирович** окончил в 2012 г. электроэнергетический факультет РГППУ. Аспирант кафедры электрооборудования и энергоснабжения РГППУ.

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 2, pp. 57–64.*

## Mathematical Simulation of Salient-Pole Synchronous Motors with Automatically Selecting the Parameters of Local Magnetizing Characteristics

**SHREINER Rudol'f Teodorovich** (Russian State Vocational Pedagogical University — RSVPU, Yekaterinburg, Russia) — Professor, Dr.Sci. (Eng.)  
**POLYAKOV Vladimir Nikolayevich** (Ural Federal University named B.N. Yel'tsyn, Ekaterinburg, Russia) — Professor, Dr. Sci. (eng.)  
**MEDVEDEV Aleksei Vladimirovich** (RSVPU, Yekaterinburg, Russia) — Ph. D. Student

*The article addresses the problem of simulating salient-pole synchronous motors taking into account saturation and interaction of processes along the orthogonal axes. The aim of this work is to develop a motor mathematical model suitable for carrying out analytical calculations and for developing control systems for electric drives equipped with salient-pole synchronous motors. To this end, the method of local magnetizing characteristics has been modified by supplementing it with a procedure for automatically selecting the parameters. A digital algorithm for calculating the integral magnetization characteristics intended for mathematically modeling salient-pole synchronous motors in a more accurate manner has been developed. Graphs depicting the distribution of magnetic induction in local sections and the integral magnetization characteristics are presented, which confirm the possibility of taking into account saturation and mutual influence of the processes along the orthogonal axes. The article also presents the results obtained from simulating dynamic operating modes of a salient-pole synchronous electric motor in a vector control system constructed using the obtained integral magnetization vector functions. The materials presented in the article can be used in calculating steady-state and dynamic operating modes of salient-pole and nonsalient-pole synchronous motors and in constructing optimized systems for frequency control of synchronous electric drives.*

**Key words:** synchronous salient-pole motor, electromagnetic excitation, accounting the magnetic circuit magnetization, method of local magnetization characteristics, automatic selection of parameters

### REFERENCES

1. **Sipailov G.A., Kononenko E.V., Khor'kov K.A.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1987, 287 p.
2. **Veinger A.M.** *Reguliruyemyi sinkhronnyi elektroprivod* (Controlled synchronous electric drive). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1985, 224 p.
3. **Polyakov V.N., Shreiner R.T.** *Energoeffektivnye rezhimy reguliruyemykh elektroprivodov peremennogo toka* (Energy-efficient

modes of controlled AC drives). Ekaterinburg, Publ. Russian State Vocational Pedagogical University, 2012, 222 p.

4. **Fil'ts R.V., Glukhivskii L.I.** *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1970, No. 6, pp. 30–34.

5. **Fil'ts R.V., Glukhivskii L.I.** *Izv. vuzov. Elektromekhanika — in Russ. (News of Higher Education Institutions. Electromechanics)*, 1973, No. 1, pp. 17–28.

6. **Oganyan R.V.** *Elektrotehnika — in Russ. (Electrical Engineering)*, 1966, No. 8, pp. 9–12.

7. **Rikhter R.** *Elektricheskiye mashiny, t. 2.* (Electrical machines, vol. 2). Moscow, Publ. ONTI NKTP SSSR, 1936, 690 p.
8. **Xie G., Ramshaw R.S.** Nonlinear model of synchronous machine with saliency. – Trans. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1986, vol. EC-1, No. 3, pp. 198–203.
9. **Bespalov V.Ya., Mashinskii Yu.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1984, No. 1, p. 57.
10. **Akhmatov M.G.** *Sinkhronnye mashiny* (Synchronous machines). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1984, 135 p.
11. **Kar N.C., El-Serafi A.M.** 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, 2002, vol. 1, pp. 172–177.
12. **De Mello F.P., Hannett L.N.** Representation of saturation in synchronous machines. – IEEE Trans. Power Syst., 1986, vol.1, No. 1, pp. 8–18.
13. **Levi E.** Saturation modeling in d-q axis models of salient-pole synchronous machines. – IEEE Trans. Energy Convers., 1999, vol. 14, No. 1, pp. 44–50.
14. **El-Serafi M., Wu J.** Saturation representation in synchronous machine models. – Electric Mach. Power Syst., 1992, vol. 20, No. 4, pp. 355–369.
15. **Ivanov-Smolenskii A.V.** *Elektromagnitnye polya i protsessy v elektricheskikh mashinakh i ikh fizicheskoye modelirovaniye* (Electromagnetic fields and processes in electrical machines and their physical simulation). Moscow, Publ. «Energiya», 1969, 304 p.
16. **Sidorov O.Yu., Sarapulov F.N., Sarapulov S.F.** *Metody konechnykh elementov i konechnykh raznostei v elektromekhanike i elektrotekhnologii* (Finite elements methods and finite differences in electromechanics and electrotechnology). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 2010, 331 p.
17. **Shut'ko V.F.** *Uravneniya dinamiki elektricheskikh mashin i metody ikh resheniya* (Dynamic equations of electrical machines and their solution). Ekaterinburg, Publ. Ural State Technical University, 1999, 155 p.
18. **Kar N.C., El-Serafi A.M.** Methods for determining the intermediate-axis saturation characteristics of salient-pole synchronous machines from the measured d-axis characteristics – IEEE Trans. Energy conversion, 2005, vol. 20, No. 1, pp. 88–97.
19. **Postnikov I.M.** *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin* (Designing of electrical machines). Kiev, Publ. Gostekhlit, 1960.
20. **Filho E.R., Nunes F.L. Jr.** Synchronous machine field current calculation taking into account the magnetic saturation. – Sba Controle & Automação, 2002, vol. 13, No. 2, pp. 165–170.
21. **Khimmel'blau D.** *Prikladnoye nelineinoye programmirovaniye* (Applied nonlinear programming). Moscow, Publ. «Mir», 1975, 534 p.

\* \* \*

### Зарубежная подписка

на журнал «Электричество»  
оформляется через фирмы-партнеры ЗАО «МК-Периодика» или непосредственно  
в ЗАО «МК-Периодика» по адресу:  
Россия, 111524 Москва, Электродная ул., 10, стр. 3  
ЗАО «МК-Периодика»;  
тел. (495) 672-70-12; факс (495) 306-37-57  
E-mail: [info@periodicals.ru](mailto:info@periodicals.ru)  
Internet: <http://www.periodicals.ru>

To effect subscription it is necessary to address to one of the partners of JSC «МК-Periodica» in your country or to JSC «МК-Periodica» directly.

Address: Russia, 111524 Moscow; 10, str.3, Elektrodnyaya ul.  
JSC «МК-Periodica»  
Tel.: (495) 672-70-12; fax (495) 306-37-57  
E-mail: [info@periodicals.ru](mailto:info@periodicals.ru)

Internet: <http://www.periodicals.org>

