

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-637-644

## IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE RELUCTANCE MOTOR WITH ANISOTROPIC MAGNETIC CONDUCTIVITY OF ROTOR

V. F. Samoseyko<sup>1</sup>, S. V. Sharashkin<sup>1, 2</sup>, F. A. Gelver<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> — Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

*The work describes algorithm identification parameters of the reluctance motor with anisotropic magnetic conductivity of rotor. The different types of electrical motors for ship propulsion system, given their advantages and disadvantages were considered. The advantages of reluctance motor with anisotropic magnetic conductivity of the rotor are given in the construction of propulsion systems. Such machines can successfully compete with electric motors, the excitation of which is carried out by permanent magnets, both in terms of energy characteristics and mass dimensions. The article describes a technique based on an analytical description of voltages and currents in stator windings, allowing to identifying the parameters characterizing the dynamics of electromagnetic processes in a reluctance motor with anisotropic magnetic conductivity of rotor. In the analysis of equations with periodically changing coefficients, the results of the Lyapunov-Floquet theory and the transformation to equations with constant coefficients were used. To identify the parameters of an electric machine with anisotropic magnetic conductivity of the rotor, quadratic integral functional are introduced. Estimates of the parameters found by the proposed method are optimal when considering them from the standpoint of given quadratic integral functional. The proposed algorithm for identifying the parameters of a reluctance motor with anisotropic magnetic conductivity of rotor allows one to find parameter estimates directly in the process of functioning of an electric machine and, consequently, can be used to construct adaptive control systems, and also to study various operating modes of a reluctance motor with anisotropic magnetic conductivity of rotor. Describes a model illustrating the algorithm for identifying the parameters of a reactive motor is given, which makes it possible to determine the longitudinal inductance of its windings. The developed algorithm for determining the parameters of a reactive electric machine with an anisotropic magnetic conductivity of the rotor makes it possible to create highly accurate control systems for the electric drive of electromotive systems.*

*Keywords: Reluctance motor, anisotropic magnetic conductivity, automatic identification of parameters, control algorithm, ripple inductance, periodic coefficients, quadratic integral functional, coefficient matrices, magnetization current.*

### For citation:

Samoseyko, Veniamin F., Sergei V. Sharashkin, and Fedor A. Gel'ver. "Identification of the parameters of the reluctance motor with anisotropic magnetic conductivity of rotor." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 9.3 (2017): 637–644. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-637-644.

УДК 621

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТИВНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С АНИЗОТРОПНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ РОТОРА

В. Ф. Самосейко<sup>1</sup>, С. В. Шарашкин<sup>1, 2</sup>, Ф. А. Гельвер<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> — ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Статья посвящена разработке алгоритма автоматической идентификации параметров реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Рассматриваются основные достоинства и недостатки синхронных электродвигателей при построении систем электропривода судов. Приводятся преимущества реактивных машин с анизотропной магнитной проводимостью ротора при построении гребных электрических установок. Такие машины могут успешно конкурировать*

ровать с электрическими двигателями, возбуждение которых осуществляется постоянными магнитами как по энергетическим характеристикам, так и массогабаритных показателям. В статье приводится методика, основанная на аналитическом описании напряжений и токов в статорных обмотках, позволяющая идентифицировать параметры характеризующие динамику электромагнитных процессов в реактивных двигателях с анизотропной магнитной проводимостью ротора. При анализе уравнений с периодически меняющимися коэффициентами были использованы результаты теории Ляпунова–Флоке и выполнено преобразование к уравнениям с постоянными коэффициентами. Для идентификации параметров электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора введены квадратичные интегральные функционалы. Оценки параметров, найденные предложенным методом, являются оптимальными при рассмотрении их с позиций заданных квадратичных интегральных функционалов. Предложенный алгоритм идентификации параметров реактивной машины позволяет находить оценки параметров непосредственно в процессе функционирования электрической машины а, следовательно, может быть использован для построения адаптивных систем управления, а также для исследования различных режимов работы реактивного электродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Приведена модель, иллюстрирующая алгоритм идентификации параметров реактивного электродвигателя, позволяющая определять продольную индуктивность его обмоток. Разработанный алгоритм определения параметров реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора позволяет создавать высокоточные системы управления электроприводом систем электродвижения.

*Ключевые слова:* реактивная электрическая машина, анизотропная магнитная проводимость, идентификация параметров машины, алгоритм управления, пульсации индуктивности, периодические коэффициенты, квадратичные интегральные функционалы, матрицы коэффициентов, ток намагничивания.

#### Для цитирования:

Самосейко В. Ф. Идентификация параметров реактивного электродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора / В. Ф. Самосейко, С. В. Шарашкин, Ф. А. Гельвер // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 637–644. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-637-644.

### Введение

В настоящее время вопрос построения систем электродвижения судов является актуальным, при этом большая часть разработчиков отдает предпочтение в выборе приводного электродвигателя синхронным электрическим машинам, поскольку этот тип двигателей является наиболее перспективным [1] – [4]. На сегодняшний день синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов обладают наилучшими энергетическими характеристиками и наименьшими габаритами. При этом они имеют ряд недостатков: невозможность снятия магнитного поля с ротора, что может приводить к аварийным ситуациям; необходимость обеспечения защиты от металлической пыли, которая притягивается к ротору и может привести к заклиниванию ротора и искажению симметрии магнитной системы; возможность размагничивания магнитов при низких температурах [5] – [7].

Реактивные двигатели с анизотропной магнитной проводимостью ротора [5], [8], [9] могут успешно конкурировать с электрическими машинами, возбуждение которых осуществляется постоянными магнитами как по энергетическим характеристикам, так и по массогабаритным показателям. Для формирования алгоритмов управления реактивными двигателями с анизотропной магнитной проводимостью ротора, а также для исследования их свойств необходимо знать параметры данных двигателей, характеризующие динамику протекающих в них процессов. Подробно эти исследования были опубликованы П. Эйхоффом в монографии 1975 г. «Основы идентификации систем управления» (1975 г.), Н. С. Райбманом в работе (1981 г.) «Дисперсионная идентификация», а также в публикациях [10], [11]. В данной статье приводится методика, позволяющая идентифицировать параметры, характеризующие динамику электромагнитных процессов в реактивных электрических машинах с анизотропной магнитной проводимостью ротора.

### Методы и материалы

Динамика электромагнитных процессов в электрических машинах характеризуется уравнениями фазных напряжений в ее обмотках. У реактивных электрических машин индуктивности

обмотки статора пульсируют вследствие анизотропной магнитной проводимости ротора. Таким образом, уравнения напряжений, записанные в естественной системе координат, имеют индуктивности, которые пульсируют в функции угла поворота ротора. Анализировать уравнения с периодически меняющимися коэффициентами достаточно проблематично. Поэтому для их анализа принято использовать результаты теории Ляпунова–Флоке и преобразовывать уравнения с периодическими коэффициентами к уравнениям с постоянными коэффициентами.

Для этого на поперечном разрезе ротора вводится система координат  $d, q$ , ось  $d$  которой совпадает с направлением наибольшей магнитной проводимости, а ось  $q$  — наименьшей. Уравнения в преобразованных осях координат  $d, q$  обычно записываются без учета влияния магнитопровода и имеют следующий вид [5], [12], [13] – [15]:

$$\begin{aligned} u_d &= R \cdot i_d - \omega \cdot L_q \cdot i_q + L_d \cdot p i_d; \\ u_q &= R \cdot i_q + \omega \cdot L_d \cdot i_d + L_q \cdot p i_q, \end{aligned}$$

где  $R$  — электрическое сопротивление обмотки статора;  $L_d$  и  $L_q$  — соответственно полная продольная и поперечная индуктивности машины по осям координат  $d, q$ .

Влияние магнитопровода проявляется в дополнительных потерях электроэнергии. Эти потери могут быть учтены путем введения дополнительных сопротивлений в уравнении машины. Поэтому далее для идентификации параметров машины полагается, что сопротивления по осям  $d, q$  различны и уравнения напряжений на обмотках ротора в осях координат  $d, q$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} u_d &= R_d \cdot i_d - \omega \cdot L_q \cdot i_q + L_d \cdot p i_d; \\ u_q &= R_q \cdot i_q + \omega \cdot L_d \cdot i_d + L_q \cdot p i_q. \end{aligned} \quad (1)$$

Согласно данным уравнениям, параметрами машины являются  $R_d, R_q$  — сопротивления обмотки статора по продольной и поперечной осям, а также  $L_d$  и  $L_q$  — полная продольная и поперечная индуктивности машины. Будем полагать, что данная совокупность параметров  $R_d, R_q, L_d, L_q$  известна с погрешностью, и будем ее оценивать по результатам наблюдений токов в процессе функционирования.

Полагается, что токи  $i_d$  и  $i_q$  — наблюдаемые переменные состояния, информация о которых поступает с датчиков токов. Напряжения  $u_d$  и  $u_q$  являются управляющими переменными, значения которых формируются системой управления. Таким образом, переменные состояния  $i_d$  и  $i_q$  динамической модели машины (1), а также напряжения  $u_d$  и  $u_q$  полагаются известными. Неизвестными в этой модели являются значения параметров  $R_d, R_q, L_d$  и  $L_q$ .

Используя уравнения напряжений (1), введем функции параметров:

$$\begin{aligned} \Delta u_d(R_d, L_d, L_q) &= u_d - R_d \cdot i_d + \omega \cdot L_q \cdot i_q - L_d \cdot p i_d; \\ \Delta u_q(R_q, L_d, L_q) &= u_q - R_q \cdot i_q - \omega \cdot L_d \cdot i_d - L_q \cdot p i_q. \end{aligned} \quad (2)$$

Данные функции являются также функциями времени  $t$ . Очевидно, что если модель адекватна, а параметры известны точно, то значения функции  $\Delta u_d(R_d, L_d, L_q) = 0$  и  $\Delta u_q(R_q, L_d, L_q) = 0$ .

Для идентификации параметров модели (1) используем квадратичные интегральные критерии качества модели

$$J_d = \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \Delta u_d^2(R_d, L_d, L_q) \cdot dt \quad \text{и} \quad J_q = \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \Delta u_q^2(R_q, L_d, L_q) \cdot dt, \quad (3)$$

где  $T$  — интервал времени, существенно превосходящий наибольшую из постоянных времени машины  $T_d = L_d/R_d$ . В качестве параметров модели (1) будем принимать значения  $R_d$  и  $L_q$ , минимизирующие критерий качества модели  $J_d$  и значения  $R_q$  и  $L_d$ , минимизирующие функционал  $J_q$ .

Для нахождения параметров модели составим систему, состоящую из четырех уравнений идентификации параметров реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_d}{\partial R_d} &= -\frac{2}{T} \cdot \int_t^{t+T} \Delta u_d(R_d, L_d, L_q) \cdot i_d \cdot dt = 0; & \frac{\partial J_d}{\partial L_q} &= \frac{2}{T} \cdot \int_t^{t+T} \Delta u_d(R_d, L_d, L_q) \cdot \omega \cdot i_q \cdot dt = 0; \\ \frac{\partial J_q}{\partial R_q} &= -\frac{2}{T} \cdot \int_t^{t+T} \Delta u_q(R_d, L_d, L_q) \cdot i_q \cdot dt = 0; & \frac{\partial J_q}{\partial L_d} &= -\frac{2}{T} \cdot \int_t^{t+T} \Delta u_q(R_d, L_d, L_q) \cdot \omega \cdot i_d \cdot dt = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Если в выражениях (4) выполнить интегрирование с учетом функции параметров (2), то данные уравнения могут быть представлены в виде системы линейных алгебраических уравнений следующего вида:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B}, \quad (5)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & 0 & A_{23} & A_{24} \\ 0 & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ 0 & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} R_d \\ R_q \\ L_d \\ L_q \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Элементы матриц коэффициентов  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  определяются выражениями:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} i_d^2 \cdot dt; & A_{13} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} i_d \cdot di_d; & A_{14} &= -\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot i_d \cdot i_q \cdot dt; \\ A_{21} &= -\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot i_d \cdot i_q \cdot dt; & A_{23} &= -\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot i_q \cdot di_d; & A_{24} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega^2 \cdot i_q^2 \cdot dt; \\ A_{32} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} i_q^2 \cdot dt; & A_{33} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot i_d \cdot i_q \cdot dt; & A_{34} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} i_q \cdot di_q; \\ A_{42} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot i_d \cdot i_q \cdot dt; & A_{43} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega^2 \cdot i_d^2 \cdot dt; & A_{44} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot i_d \cdot di_d; \\ B_1 &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} u_d \cdot i_d \cdot dt; & B_2 &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot u_d \cdot i_q \cdot dt; & B_3 &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} u_q \cdot i_q \cdot dt; & B_4 &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot u_q \cdot i_d \cdot dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Если положить, что матрица  $\mathbf{A}$  невырожденная, то решение системы уравнений (5) относительно вектора параметров в матричном виде

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B}. \quad (8)$$

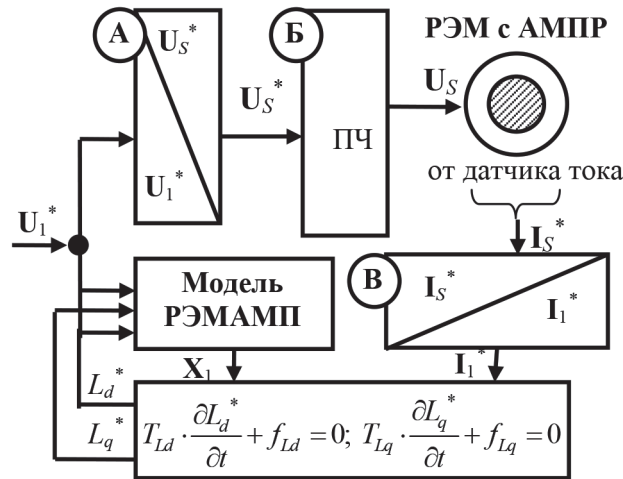
В развернутом виде решение системы уравнений (5) относительно параметров  $R_d, R_q, L_q, L_d$  не приводится ввиду его громоздкости. Заметим, что элементы матриц коэффициентов  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  вычисляются как скользящее среднее. Следовательно, параметров  $R_d, R_q, L_q, L_d$  будут также функциями времени  $t$ . Время, затрачиваемое на вычисление параметров, определяется периодом усреднения  $T$ . Если идентифицируемый объект отличается от модели, то период усреднения  $T$  целесообразно выбирать, руководствуясь неравенством  $T \geq T_d/2$ , где  $T_d = L_d/R_d$  — наибольшая постоянная времени модели.

### Результаты

В результате проделанной работы была сформирована структурная схема, иллюстрирующая алгоритм идентификации продольной индуктивности обмоток статора реактивного элек-

тродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Применение вышеописанного алгоритма решения дифференциального уравнения настройки угла положения ротора позволяет получать информацию о параметрах обмоток в процессе работы электропривода. Получены алгоритмы идентификации параметров в стационарном режиме работы и в режиме стабилизации тока намагничивания, что особенно важно при построении систем управления реактивными электрическими машинами.

Иллюстрация алгоритма идентификации продольной индуктивности обмотки статора приведена на рисунке.



Алгоритм идентификации продольной индуктивности обмотки статора:  
 А — алгоритм преобразования координат; Б — преобразователь частоты;  
 В — алгоритм решения дифференциального уравнения настройки угла положения ротора;  
 $x_d, x_q$  — элементы вектора  $\mathbf{X1}$ ;  $i_d^*, i_q^*$  — элементы вектора  $\mathbf{I}_1^*$

### Обсуждение

Для идентификации параметров реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью был получен следующий алгоритм. Стационарный режим работы характеризуется равенствами  $pi_d=0, pi_q=0$  в динамической модели машины (1). В этом режиме коэффициенты  $A_{13}=A_{23}=A_{34}=A_{44}=0$  и матрица коэффициентов  $\mathbf{A}$  уравнения идентификации параметров (8) вырождается. Матрицы  $\mathbf{A}^{-1}$  обратной матрице  $\mathbf{A}$  в стационарном режиме работы машины не существует. Для сингулярной матрицы  $\mathbf{A}$  существуют методы задания псевдообратной матрицы  $\mathbf{A}^+$  (метод регуляризации Тихонова, описанный в работах А. Н. Тихонова, В. Я. Арсенина «О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения» 1965 г., Дж. Форсайта, М. Малькольма и К. Моулера «Машинные методы математических вычислений» 1980 г., а также метод сингулярного разложения, изложенный в трудах Я. З. Цыпкина «Информационная теория идентификации» (1995 г.) и П. Эйкхоффа «Основы идентификации систем управления» (1975 г.)). Однако однозначно определить всю совокупность параметров идентификации  $\mathbf{X}$  невозможно. В случае стационарного режима ранг матрицы  $\mathbf{A}$  равен двум. Следовательно, однозначно можно определить лишь два параметра из четырех, если другие два параметра заданы.

Для непрерывной идентификации параметров во всех режимах функционирования электрической машины необходимо контролировать определитель матрицы  $\mathbf{A}$  и сравнивать его с точностью вычислений  $\varepsilon$ . Условие  $\det(\mathbf{A}) > \varepsilon$  характеризует наличие динамики вектора переменных состояния объекта. В этом случае значения вектора параметров  $\mathbf{X}$  определяются по формуле (5). Если  $\det(\mathbf{A}) \leq \varepsilon$ , то следует сохранять значения вектора параметров  $\mathbf{X}$ , определенные ранее при выполнении условия  $\det(\mathbf{A}) > \varepsilon$ .

Для идентификации параметров электродвигателя в наиболее распространенном режиме стабилизации тока намагничивания получен ранее описанный алгоритм. В этом режиме система

автоматического управления поддерживает постоянство тока намагничивания  $i_d$ . В данном режиме работы коэффициенты  $A_{13}=A_{23}=0$ . Можно показать, что при наличии динамики переменной  $i_q$  динамической модели машины (1) матрица коэффициентов  $A$  уравнения идентификации параметров не вырождается, что позволяет оценивать всю совокупность параметров динамической модели машины. Однако следует заметить, что скорость протекания динамических процессов в поперечном контуре достаточно высока. Поэтому период усреднения  $T$  целесообразно выбирать, руководствуясь неравенством  $T \geq T_q/2$ , где  $T_q = L_q/R_q$  — наименьшая постоянная времени модели.

### Заключение

Предложенный алгоритм идентификации параметров реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора позволяет находить оценки параметров непосредственно в процессе функционирования машины. Оценки параметров, найденные этим методом, являются оптимальными при рассмотрении их с позиций выбранных квадратичных интегральных функционалов (3), они минимизируют интегральный квадратичный критерий отличия переменных состояния реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора от его модели. Алгоритм идентификации работает только при наличии динамики переменных состояния объекта и сохраняет значения параметров, полученные значения в стационарных режимах функционирования. Он может применяться для построения адаптивных систем управления, корректирующих параметры регуляторов в процессе функционирования электропривода, а также для исследования режимов работы реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора.

Разработанный алгоритм идентификации параметров реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора позволяет создавать высокоточные системы управления электропривода систем электродвижения, что особенно важно при построении современных электроприводов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Судовая система электродвижения нового поколения / А. В. Григорьев // Морской флот. — 2012. — № 2. — С. 38–40.
2. Васин И. М. Особенности создания гребного автоматизированного электропривода для судов с электродвижением ледового класса / И. М. Васин // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. — Саранск: Нац. исследовательский Мордовский гос. ун-т им. Н. П. Огарёва, 2014. — С. 458–462.
3. Мустафа Г. М. Преобразователь частоты для гребного электродвигателя / Г. М. Мустафа, С. В. Волков, А. А. Ершов [и др.] // Электротехника. — 2014. — № 1. — С. 46–53.
4. Григорьев М. А. Система импульсно-векторного управления синхронным реактивным электродвигателем с независимым управлением по каналу возбуждения. / М. А. Григорьев, А. Н. Шишков, Е. В. Белосусов [и др.] // Научная дискуссия: вопросы технических наук. — 2015. — №5-6. — С. 110–116.
5. Самосейко В. Ф. Синхронные машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления / В. Ф. Самосейко, Ф. А. Гельвер, В. А. Хомяк [и др.]. — СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2016. — 174 с.
6. Hofmann H. H. High-speed synchronous reluctance machine with minimized rotor losses. / H. H. Hofmann, S.R. Sanders // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2000. — Vol. 36. — Is. 2. — Pp. 531–539. DOI: 10.1109/28.833771.
7. Пат. 2603200 Российская Федерация, МПК Н 02 К 1/24, Н 02 К 37/04. Синхронный электрический двигатель с анизотропной магнитной проводимостью ротора / В. А. Хомяк, В. Ф. Самосейко, С. В. Шарашкин, Ф. А. Гельвер; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Крыловский государственный научный центр». — № 2015140439/07; заявл. 22.09.2015; опубл. 27.11.2016, Бюл. № 33.
8. Самосейко В. Ф. Теоретические основы управления электроприводом: учеб. пособие / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.

9. Самосейко В. Ф. Управление гребным реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора / В. Ф. Самосейко, С. В. Шарашкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-390-401.

10. Sahoo S. K. Piece-wise polynomial based model for switched reluctance motor / S. K. Sahoo, S. K. Panda, J. X. Xu // Power and Energy Society General Meeting — Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century 2008 IEEE. — IEEE, 2008. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/PES.2008.4596253.

11. Mir S. Fault-tolerant switched reluctance motor drive using adaptive fuzzy logic controller / S. Mir, M. S. Islam, T. Sebastian, I. Husain // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2004. — Vol. 19. — Is. 2. — Pp. 289–295. DOI: 10.1109/TPEL.2003.823244.

12. Самосейко В. Ф. Перспективы использования реактивных электрических машин в электроприводе / В. Ф. Самосейко, Ф. А. Гельвер, И. В. Белоусов // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. — Пермь: Пермский нац. исслед. политехнический ун-т, 2016. — С. 359–363.

13. DiRenzo M. T. Switched Reluctance Motor Control—Basic Operation and Example Using the TMS320F240 / M. T. DiRenzo // Texas Instruments, Digital Signal Processing Solutions, in SPRA420A-February. — 2000. — 62 p.

14. Germishuizen J. J. Performance comparison of reluctance synchronous and induction traction drivers for electrical multiple units / J. J. Germishuizen, F. S. Van der Merwe, K. Van der Westhuizen, M. J. Kamper // Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE. — IEEE, 2000. — Vol. 1. — Pp. 316–323. DOI: 10.1109/IAS.2000.881130.

15. Taghavi S. A core analysis of the synchronous reluctance motor for automotive applications / S. Taghavi, P. Pillay // Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on. — IEEE, 2014. — Pp. 961–967. DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960297.

## REFERENCES

1. Grigor'ev, A. V. "Sudovaya sistema elektrodvizeniya novogo pokoleniya." *Morskoi flot* 2 (2012): 38–40.
2. Vasin, I. M. "Osobennosti sozdaniya grebnogo avtomatizirovannogo elektropivoda dlya sudov s elektrodvizeniem ledovogo klassa." *Trudy VIII mezhdunarodnoi (XIX vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektropivodu AEP-2014*. Saransk: Natsional'nyi issledovatel'skii Mordovskii gosudarstvennyi universitet im. N. P. Ogareva, 2014. 458–462.
3. Mustafa, G. M., A. M. Ershov, Y. M. Sennov, S. V. Volkov, and G. M. Minaev. "A frequency converter for a propelling electric motor." *Russian Electrical Engineering* 85.1 (2014): 45–52. DOI: 10.3103/S106837121401009X.
4. Grigorev, Maxim, Alexander Shishkov, Eugene Belousov, Dmitry Sychev, Artem Menshenin, and Eugene Hayatov. "Pulse vector control system of the field regulated reluctance machine." *Nauchnaya diskussiya: voprosy tekhnicheskikh nauk* 5-6 (2015): 110–116.
5. Samoseiko, V. F., F. A. Gel'ver, V. A. Khomyak, and D. A. Khairov. *Sinkhronnye mashiny s anizotropnoi magnitnoi provodimost'yu rotora. Metodika proektirovaniya. Algoritmy upravleniya*. Edited by V. F. Samoseiko. SPb.: Izd. Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2016.
6. Hofmann, Heath, and Seth R. Sanders. "High-speed synchronous reluctance machine with minimized rotor losses." *IEEE Transactions on Industry Applications* 36.2 (2000): 531–539. DOI: 10.1109/28.833771
7. Khomyak, V. A., V. F. Samoseiko, S. V. Sharashkin, and F. A. Gel'ver. RU 2 603 200 C1, IPC H 02 K 1/24, H 02 K 37/04. Sinkhronnyi elektricheskii dvigatel' s anizotropnoi magnitnoi provodimost'yu rotora. Russian Federation, assignee. 27 Nov. 2016.
8. Samoseiko, V. F. *Teoreticheskie osnovy upravleniya elektropivodom: uchebnoe posobie*. SPb.: Elmor, 2007.
9. Samoseiko, Veniamin F., and Sergei V. Sharashkin. "Control of the reluctance motor with an anisotropic magnetic conductivity of rotor in ship propulsion system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-390-401.
10. Sahoo, S. K., S. K. Panda, and J. X. Xu. "Piece-wise polynomial based model for switched reluctance motor." *Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. IEEE, 2008: 1–4. DOI: 10.1109/PES.2008.4596253.
11. Mir, Sayeed, M. S. Islam, T. Sebastian, and I. Husain. "Fault-tolerant switched reluctance motor drive using adaptive fuzzy logic controller." *IEEE Transactions on Power Electronics* 19.2 (2004): 289–295. DOI: 10.1109/TPEL.2003.823244.

12. Samoseiko, V. F., F. A. Gelver, and I. V. Belousov. "Prospects for the use of reactive electric machine in the electric drive." *Trudy IX mezhdunarodnoi (XX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016*. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2016: 359–363.

13. DiRenzo, Michael T. "Switched reluctance motor control—basic operation and example using the tms320f240." *Texas Instruments, Digital Signal Processing Solutions, in SPRA420A-February*. 2000.

14. Germishuizen, J. J., F. S. Van der Merwe, K. Van der Westhuizen, and M. J. Kamper. "Performance comparison of reluctance synchronous and induction traction drives for electrical multiple units." *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*. Vol. 1. IEEE, 2000: 316–323. DOI: 10.1109/IAS.2000.881130.

15. Taghavi, Seyedmorteza, and Pragasen Pillay. "A core analysis of the synchronous reluctance motor for automotive applications." *Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on*. IEEE, 2014: 961–967. DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960297.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Самосейко Вениамин Францевич** —

доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru),  
[samoseyko@mail.ru](mailto:samoseyko@mail.ru)

**Шарашкин Сергей Владимирович** — аспирант

*Научный руководитель:*  
Самосейко Вениамин Францевич  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
ФГУП «Крыловский государственный  
научный центр»  
196758, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
Московское ш., 44  
e-mail: [s\\_sharashkin@mail.ru](mailto:s_sharashkin@mail.ru),  
[sergey.nii.opr@gmail.com](mailto:sergey.nii.opr@gmail.com)

**Гельвер Федор Андреевич** —

кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
ФГУП «Крыловский государственный  
научный центр»  
196758, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
Московское ш. 44  
e-mail: [gelver@bk.ru](mailto:gelver@bk.ru)

**Samoseiko, Veniamin F.** —

Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru),  
[samoseyko@mail.ru](mailto:samoseyko@mail.ru)

**Sharashkin, Sergei V.** — Postgraduate

*Supervisor:*  
Samoseiko, Veniamin F.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
Krylov State Research Centre  
44 Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158,  
Russian Federation  
e-mail: [s\\_sharashkin@mail.ru](mailto:s_sharashkin@mail.ru),  
[sergey.nii.opr@gmail.com](mailto:sergey.nii.opr@gmail.com)

**Gel'ver, Fedor A.** —

PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
Krylov State Research Centre  
44 Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158,  
Russian Federation  
e-mail: [gelver@bk.ru](mailto:gelver@bk.ru)

Статья поступила в редакцию 15 мая 2017 г.

Received: May 15, 2017.