

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-390-401

CONTROL OF THE RELUCTANCE MOTOR WITH AN ANISOTROPIC MAGNETIC CONDUCTIVITY OF ROTOR IN SHIP PROPULSION SYSTEM

V. F. Samoseiko, S. V. Sharashkin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

The work describes the different types of electrical motors for ship propulsion system, given their advantages and disadvantages. A new type of electric motor, which for obvious reasons is the most promising in the motor selection issue for electric propulsion systems. Based on research conductede the advantages of synchronous reluctance machine with anisotropic magnetic conductivity of rotor compared to other types of engines. It was revealed that the synchronous reluctance machine have high-energy characteristics and good mass-dimensional indicators. Shows different embodiments of the rotor of the synchronous reluctance machine with anisotropic magnetic conductivity of rotor and their advantages. The mathematical description of the voltages and currents in synchronous reluctance machine, set their connection with the electromagnetic torque and rotor speed. Based on the mathematical description of the resulting contours formed by the control of electromagnetic torque and rotor speed. Methods for reducing the static and dynamic control errors. It formed a block diagram of a motor control system. In accordance with the block diagram produced by modeling of electromagnetic processes in synchronous reluctance machine with anisotropic magnetic conductivity of rotor. As a result of simulation obtained graphs of the electromagnetic torque and the electric machine rotor speed when starting idling and then lashed the load. It was concluded that a synchronous reluctance machine with anisotropic magnetic conductivity of rotor in the construction of the subordinate control system provides the necessary characteristics for the construction of electromechanical propulsion system of ships. It is shown that, when setting up the control circuits, electromechanical drive with synchronous reluctance machine characteristics close to those of an electric motor drive with DC motor.

Key words: sheep propulsion system, synchronous reluctance machine, control system, anisotropic magnetic conductivity

For citation:

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.

УДК 621

УПРАВЛЕНИЕ ГРЕБНЫМ РЕАКТИВНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ С АНИЗОТРОПНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ РОТОРА

В. Ф. Самосейко, С. В. Шарашкин

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье приведены достоинства и недостатки различных типов электрических машин, применяемых при построении систем электродвижения судов. Предложен новый тип электрического двигателя, который по объективным причинам является наиболее перспективным в вопросе выбора электродвигателя для электропривода гребной электрической установки. На основании разработок обоснованы преимущества реактивных электрических машин с анизотропной магнитной проводимостью ротора по сравнению с другими типами двигателей. Выявлено, что реактивные электрические машины обладают высокими энергетическими характеристиками и хорошими массогабаритными показателями. Приведены различные варианты исполнения ротора реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора и показаны их преимущества. Получено математическое описание напряжений и токов в реактивной электрической машине, установлена их связь с электромагнитным моментом и скоростью вращения ротора. На основе полученного математического описания сформированы контуры управления электромагнитным моментом и скоростью вращения ротора. Предложены методы уменьшения статиче-



ской и динамической ошибок управления. Сформирована структурная схема электродвигателя с системой управления. В соответствии со структурной схемой произведено моделирование электромагнитных процессов в реактивном электродвигателе с анизотропной магнитной проводимостью ротора. В результате моделирования получены графики изменения электромагнитного момента и скорости вращения ротора электрической машины при пуске на холостом ходу и последующим набросом нагрузки. Сделан вывод, что реактивный электродвигатель с анизотропной магнитной проводимостью ротора при построении подчиненной системы управления обеспечивает необходимые электромеханические характеристики для работы системы электродвижения судов. Показано, что при настройке контуров управления электромеханические характеристики привода с реактивным электродвигателем близки к характеристикам привода с двигателем постоянного тока.

Ключевые слова: реактивный электродвигатель, электродвижение судов, анизотропная магнитная проводимость, система управления

Для цитирования:

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.

Введение

В настоящее время выбор электрического двигателя для построения системы электродвижения судов является актуальной задачей [1], [2]. При построении гребной электрической установки используют следующие типы электрических машин: асинхронный электрический двигатель с короткозамкнутым ротором, двигатель постоянного тока, синхронный электродвигатель с постоянными магнитами. В работах [3] – [5] приводятся исследования в области создания гребных установок на базе асинхронного электрического двигателя с короткозамкнутым ротором. В источнике [6] подробно рассматривается система электродвижения с электродвигателем постоянного тока при питании его от сети переменного тока через выпрямитель напряжения. В работах [7] – [9] выявлены основные преимущества современных систем электродвижения на базе синхронных электрических машин с постоянными магнитами на роторе.

На основании анализа литературы выявлены достоинства и недостатки различных типов электрических двигателей (табл. 1).

Таблица 1

	Двигатель постоянного тока	Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором	Синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов
Достоинства	виброшумовые характеристики; высокая перегрузочная способность; простота управления	высокая технологич- ность производства; низкая стоимость; надежность	возможность глубокого регулиро- вания без потерь энергетической эффективности; хорошие массогабаритные характеристики; простота управления; отсутствие обмоток на роторе
Недостатки	низкая надежность, за счет щеточно-коллек- торного механизма; плохие массогабарит- ные характеристики; необходимость отведе- ния тепла из якоря	низкая перегрузочная способность; необходимость отведения тепла из ротора	чувствительность к высоким электромагнитным полям; необходимость обеспечения защиты от металлической пыли; высокая аварийная опасность, связанная с невозможностью снятия поля с ротора

Достоинства и недостатки различных типов электрических машин

Интерес к применению реактивных электрических машин с анизотропной магнитной проводимостью ротора обусловлен тем, что они обладают хорошими габаритами и высокими энер-



гетическими характеристиками (не уступают синхронным электродвигателям с постоянными магнитами на роторе), отведение тепла от ротора производится естественным путем без дополнительных устройств охлаждения, и без усложнения конструкции [10] – [12]. Поскольку на роторе реактивной машины отсутствуют электрические обмотки, он является пассивным, в связи с этой особенностью при аварийном отключении электродвигателя не возникает необходимость развязывать обмотки двигателя с питающей сетью, так как это происходит в системах электродвижения судов с применением синхронных электродвигателей с возбуждением от постоянных магнитов.

Наряду с решением проблемы выбора типа электродвигателя, важным является вопрос реализации системы его управления. Как известно, в современном электроприводе переменного тока для управления электрическими машинами применяются преобразователи частоты (ПЧ) [3], [13]. Построение силовой части ПЧ хорошо изучено и отработано многими отечественными и зарубежными компаниями, так же как разработка системы управления ПЧ и составление алгоритмов управления, формирующих необходимые характеристики напряжения питания на обмотках электрического двигателя [13] – [16]. Разработкой реактивных электрических машин и построением алгоритмов управления занимаются как зарубежные, так и отечественные организации.

Настоящая работа посвящена построению системы управления реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора, обеспечивающей необходимые электромеханические характеристики, а также моделированию электромагнитных процессов в двигателе.

Математическое описание напряжений и токов в обмотках реактивной машины

Рассмотрим более подробно реактивные электрические машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Существуют два типа таких машин: с поперечной и продольной шихтов-кой ротора.

В одном случае анизотропия магнитных свойств ротора достигается за счет поперечной шихтовки ротора листами электротехнической стали с вырезами, формирующими магнитные полюсы (рис. 1, a), а в другом — за счет продольной шихтовки (рис. 1, δ). Машины с такой конструкцией ротора имеют различное отношение продольной и поперечной индуктивностей, характеризующее их качество. У машин с продольной шихтовкой это отношение существенно выше, чем у машин с поперечной шихтовкой ротора сталью. Управление напряжением питания обмоток машин с анизотропной магнитной проводимостью ротора может быть реализовано от стандартного преобразователя частоты.



Рис. 1. Магнитопровод шестиполюсных машин с поперечной (а) и продольной (б) шихтовкой

Рассмотрим уравнения напряжений на обмотках статора и ротора и их отображения на плоскость поперечного сечения машины в оси координат ротора *d*, *q*. Будем полагать, что питание

2017 rog. Tom 9. Nº 2



обмоток реактивного электродвигателя осуществляется симметричной системой *m*-фазных синусоидальных напряжений с угловой частотой ω_1 , представленной вектором U_s . По обмоткам статора протекают фазные токи I_s , а по контурам ротора протекают токи I_R . Схема замещения машины приведена на рис. 2.



Рис. 2. Схема замещения машины

Вектор напряжений U_s синтезирует вентильный коммутатор-инвертор (рис. 3), где φ — начальная фаза, характеризующая сдвиг напряжения относительно продольной оси магнитной симметрии ротора d; $\rho = 2 \cdot \pi/3$; U_m — амплитуда напряжения; ω — угловая частота; m — число фаз двигателя.



Рис. 3. Схема питания реактивного электродвигателя от преобразователя частоты

При составлении уравнения напряжений полагается, что кроме обмоток статора на роторе машины находятся продольный и поперечный короткозамкнутые контуры, образующие демпферную обмотку. Полученные далее уравнения напряжений справедливы как для синхронного, так и асинхронного режимов работы электродвигателя.

В соответствии со схемой замещения по второму закону Кирхгофа, уравнения напряжений на обмотках статора и ротора могут быть записаны в матричной форме:

$$\mathbf{U}_{S} = \mathbf{R}_{S} \cdot \mathbf{I}_{S} + p \left\{ \mathbf{L}_{SS}(\gamma) \cdot \mathbf{I}_{S} \right\} + \mathbf{L}_{S} \cdot p \mathbf{I}_{S} + p \left\{ \mathbf{L}_{SR}(\gamma) \cdot \mathbf{I}_{R} \right\};$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{R}_{R} \cdot \mathbf{I}_{R} + \mathbf{L}_{RR} \cdot p \mathbf{I}_{R} + \mathbf{L}_{R} \cdot p \mathbf{I}_{R} + p \left\{ \mathbf{L}_{RS}(\gamma) \cdot \mathbf{I}_{S} \right\},$$

где U_s — вектор напряжений на обмотках статора; I_s — вектор токов в обмотках статора; I_R — вектор тока в контурах ротора; $L_{ss}(\gamma)$ — матрица основных индуктивностей *m*-фазной обмотки статора; L_{RR} — матрица индуктивностей продольного и поперечного контуров ротора; $L_{sR}(\gamma) = L_{sR}^{T}(\gamma)$ — матрица взаимных индуктивностей фазных обмоток статора и ротора; $L_s = L_s \cdot 1$ — матрица индуктивностей фазных обмоток статора и ротора; $L_s = R_s \cdot 1$ — матрица индуктивностей рассеяния обмотки статора; $R_s = R_s \cdot 1$ — матрица сопротивлений обмотки статора; R_R — матрица индуктивностей рассеяния обмотки ротора; R_R — матрица сопротивлений обмотки ротора; R_R — матри сопротивлений обмотки ротора; R_R — матри сопротивлений обмот



2017 rog. Tom 9. Nº 2

ра; *p* — оператор дифференцирования по времени *t*; $\gamma = \omega \cdot t$ — угол поворота ротора; ω — угловая электрическая скорость вращения ротора.

Уравнения напряжений на обмотках имеют периодические коэффициенты, поэтому их аналитическое решение затруднительно. Выполним преобразование переменных уравнения, полагая:

$$\mathbf{U}_{1} = \begin{bmatrix} u_{d} \\ u_{q} \end{bmatrix} = \frac{2}{m} \cdot \mathbf{D}_{S}(\gamma) \cdot \mathbf{U}_{S}; \quad \mathbf{I}_{1} = \begin{bmatrix} i_{d} \\ i_{q} \end{bmatrix} = \mathbf{D}_{S}(\gamma) \cdot \mathbf{I}_{S}; \quad \mathbf{I}_{2} = \begin{bmatrix} j_{d} \\ j_{q} \end{bmatrix} = \frac{1}{k_{ob} \cdot w} \cdot \mathbf{I}_{R},$$

где $\mathbf{D}_{s}(\gamma) = \mathbf{V}(\gamma) \cdot \mathbf{D}_{s}$ — фазная матрица обмотки статора во вращающейся системе координат ротора; $\mathbf{V}(\gamma)$ — матрица вращения, формирующаяся из сигналов энкодера; \mathbf{D}_{s} — фазная матрица обмотки статора; ω — число витков обмотки; k_{of} — обмоточный коэффициент, зависящий от распределения и укорочения обмотки, а также от скоса пазов.

$$\mathbf{V}(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{v_d^2 + v_q^2}} \cdot \begin{bmatrix} v_d & -v_q \\ v_q & v_d \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D}_{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\rho_s) & \cos(2 \cdot \rho_s) & \cdots & \cos((m-1) \cdot \rho_s) \\ 0 & \sin(\rho_s) & \sin(2 \cdot \rho_s) & \cdots & \sin((m-1) \cdot \rho_s) \end{bmatrix}$$

Уравнения напряжений обмоток статора и ротора, подвергнутые преобразованию, примут следующий вид:

$$\mathbf{U}_1 = R_1 \cdot \mathbf{I}_1 + \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{L}_{01} \cdot \mathbf{I}_1 + \mathbf{L}_{01} \cdot p\mathbf{I}_1 + \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{L}_0 \cdot \mathbf{I}_2 + \mathbf{L}_0 \cdot p\mathbf{I}_2;$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{I}_2 + \mathbf{L}_{02} \cdot p\mathbf{I}_2 + \mathbf{L}_0 \cdot p\mathbf{I}_1,$$

где L_{01} — матрица полных индуктивностей обмотки статора; L_0 — отображение матрицы основных индуктивностей фазных обмоток статора на плоскость поперечного сечения машины; $E=V(\pi/2)$ — матрица поворота на угол $\pi/2$; R_1 — отображение сопротивления обмотки статора на плоскость поперечного сечения машины; L_{02} — матрица полных приведенных индуктивностей обмотки ротора; R_2 — матрица приведенных сопротивлений обмотки ротора к обмотке статора.

$$\mathbf{L}_{01} = \begin{bmatrix} L_d & 0\\ 0 & L_q \end{bmatrix}; \ \mathbf{L}_0 = \mathbf{L}_{11} = \begin{bmatrix} L_{dd} & 0\\ 0 & L_{qq} \end{bmatrix}; \ R_1 = \frac{2}{m} \cdot R_S; \ \mathbf{L}_{02} = \begin{bmatrix} L_{d2} & 0\\ 0 & L_{q2} \end{bmatrix}; \ \mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} R_{d2} & 0\\ 0 & R_{q2} \end{bmatrix},$$

где $L_d = L_{dd} + L_1$ — полная индуктивность обмотки по оси d; L_{dd} — основная индуктивность обмотки по оси d; L_1 — индуктивность рассеивания; $L_q = L_{qq} + L_1$ — полная индуктивность обмотки по оси q; L_{dd} — основная индуктивность обмотки по оси d; L_{d2} и L_{q2} — приведенная индуктивность рассеяния продольного и поперечного контура ротора к обмотке статора, где R_{d2} и R_{q2} — приведенное сопротивление, соответственно, продольного и поперечного контура ротора к обмотке статора.

Данные уравнения являются отображениями исходных уравнений в оси координат *d*, *q*. В развернутой форме записи уравнения напряжений статора и ротора и примут следующий вид:

$$\begin{split} u_d &= R_1 \cdot i_d - \omega \cdot L_q \cdot i_q + L_d \cdot pi_d - \omega \cdot L_{qq} \cdot j_q + L_{dd} \cdot pj_d; \\ u_q &= R_1 \cdot i_q + \omega \cdot L_d \cdot i_d + L_q \cdot pi_q + \omega \cdot L_{dd} \cdot j_d + L_{qq} \cdot pj_q; \\ 0 &= R_{d2} \cdot j_d + L_{d2} \cdot pj_d + L_{dd} \cdot pi_d; \\ 0 &= R_{q2} \cdot j_q + L_{q2} \cdot pj_q + L_{qq} \cdot pi_q. \end{split}$$

Если демпфирующие контуры на роторе отсутствуют, то уравнения, описывающие динамику электромагнитных процессов, примут вид:

$$u_d = R_1 \cdot i_d - \omega \cdot L_q \cdot i_q + L_d \cdot pi_d;$$

$$u_a = R_1 \cdot i_a + \omega \cdot L_d \cdot i_d + L_a \cdot pi_a.$$

Если положить, что $pi_d = 0$; $pi_q = 0$; $i_d = I_d$; $i_q = I_q$, получим уравнения стационарного режима работы машины $j_d = j_q = 0$:

$$U_d = R_1 \cdot I_d - \omega \cdot L_q \cdot I_q; \quad U_q = R_1 \cdot I_q + \omega \cdot L_d \cdot I_d,$$

где I_d и I_q — проекции вектора стационарного тока I_1 на продольную и поперечную оси соответственно.



В стационарном режиме электромагнитные процессы характеризуются токами:

$$I_{(1)d} = \frac{R_1 \cdot U_{(1)d} + \omega \cdot L_q \cdot U_{(1)q}}{R_1^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q} = \frac{U_{(1)} \cdot (R_1 \cdot \cos(\varphi) + \omega \cdot L_q \cdot \sin(\varphi))}{R_1^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q};$$

$$I_{(1)q} = \frac{R_1 \cdot U_{(1)q} - \omega \cdot L_d \cdot U_{(1)d}}{R_1^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q} = \frac{U_{(1)} \cdot (R_1 \cdot \sin(\varphi) - \omega \cdot L_d \cdot \cos(\varphi))}{R_1^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q};$$

где $U_{(1)d} = U_{(1)} \cdot \cos(\varphi); \ U_{(1)q} = U_{(1)} \cdot \sin(\varphi); \ R_1$ — активное сопротивление обмотки статора.

Электромагнитный момент на пару полюсов ротора и фаз статора в этом случае определяется подстановкой токов в формулу

$$M = 2 \cdot L_m \cdot I_{d(1)} \cdot I_{q(1)}.$$

После подстановки получим выражение электромагнитного момента:

$$M = 2 \cdot L_m \cdot \frac{\left(R_1 \cdot U_{(1)d} + \omega \cdot L_q \cdot U_{(1)q}\right) \cdot \left(R_1 \cdot U_{(1)q} - \omega \cdot L_d \cdot U_{(1)d}\right)}{\left(R_1^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q\right)^2}.$$

Построение алгоритма управления электроприводом на базе реактивного электродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора

Формирование электромагнитного момента возможно путем воздействия на параметры напряжения: $U_{(1)}$, ω , φ . Положим, что заданы амплитуда напряжения $U_{(1)}$ и частота ω . Начальная фаза φ в этом случае будет определяться нагрузкой на валу электродвигателя, а электрическая скорость вращения ротора совпадает с угловой частотой напряжения инвертора, и реактивный электродвигатель работает в синхронном режиме.

Если положение вектора напряжений относительно положения ротора контролируется, то угол φ может быть задан системой управления. Для обеспечения максимальной энергетической эффективности необходимо обеспечивать равенство токов $I_{(1)d}$ и $I_{(1)g}$, из этого равенства следует

$$\varphi = \varphi_0 = \arctan\left(\frac{R_1 + \omega \cdot L_d}{R_1 - \omega \cdot L_q}\right).$$

Если поддерживать угол нагрузки $\phi = \phi_0$, то управлять электромагнитным моментом и скоростью вращения ротора можно, воздействуя на амплитуду напряжения $U_{(1)}$. Величина электромагнитного момента в этом случае будет определяться соотношением

$$M = \frac{U_m^2 \cdot (L_d - L_q)}{[(\omega \cdot L_d + R_1)^2 + (\omega \cdot L_q - R_1)^2]}.$$

Данное выражение определяет механические характеристики реактивного электродвигателя при управлении с максимальным значением показателя энергетической эффективности. Формирование электромагнитного момента удобно выполнять при постоянном токе намагничивания $I_{(1)d}$, при этом электромагнитный момент пропорционален току $I_{(1)q}$, который будем называть током нагрузки. Подробно вопросы формирования характеристик рассмотрены в [10], [16].

Контур управления током намагничивания можно представить в виде структурной схемы (рис. 4), опираясь на закономерности, описанные ранее.



Рис. 4. Система стабилизации тока намагничивания



2017 rog. Tom 9. Nº 2

На данной структурной схеме также изображено управляющее устройство. Объект управления и управляющее устройство образуют систему управления. Система управления имеет контур управления по возмущающему воздействию i_q^* и контур управления по отклонению тока намагничивания i_d^* от заданного значения с интегральным регулятором. Желаемая передаточная функция системы управления током намагничивания i_d^* будет иметь следующий вид:

$$W_d = \frac{1}{2 \cdot T_d^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_d \cdot p + 1} \approx \frac{1}{2 \cdot T_d \cdot p + 1}.$$

Передаточную функцию контура управления током намагничивания можно аппроксимировать апериодическим звеном первого порядка, постоянная времени которого равна $2T_d$. На вход контура управления током намагничивания действует постоянный сигнал $1/L_d^*$, который позволит стабилизировать ток намагничивания на уровне тока холостого хода.

Контур управления электромагнитным моментом можно представить в виде структурной схемы (рис. 5).



Рис. 5. Контур управления электромагнитным моментом

На данной структурной схеме также изображено управляющее устройство. Система управления, представляет собой замкнутый контур по току нагрузки с интегральным регулятором. Интегральный регулятор обеспечивает стандартное динамическое поведение контура тока i_q . Передаточная функция контура управления током нагрузки будет иметь следующий вид

$$W_q = \frac{1}{2 \cdot T_q^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_q \cdot p + 1} \approx \frac{1}{2 \cdot T_q \cdot p + 1}$$

Передаточную функцию контура можно аппроксимировать звеном первого порядка с постоянная времени $2T_q$. При моделировании электромагнитных процессов в приводе было принято для уменьшения статической ошибки добавить второй контур управления электромагнитным моментом с интегральным регулятором (рис. 6) с передаточной функцией



Рис. 6. Структурная схема со вторым контуром управления моментом



2017 год. Том 9. № 2 397

На вход контура управления моментом действует сигнал J_q^* , который позволяет задавать ток нагрузки и, соответственно, электромагнитный момент. На входе контура тока следует устанавливать блок ограничения значения электромагнитного момента, представляющий собой звено ограничения выходного сигнала.

Управление скоростью вращения ротора связано с управлением электромагнитным моментом. Эта связь следует из основного уравнения движения:

$$J \cdot p\omega = M - M_{\rm c}.$$

Для увеличения скорости необходимо, чтобы электромагнитный момент M превосходил момент сопротивления M_c , а для уменьшения скорости необходимо, чтобы электромагнитный момент M был ниже момента сопротивления M_c .

Формирование заданных динамических характеристик скорости вращения ротора производится методом последовательной коррекции. Структурная схема контура скорости приведена на рис. 7. Объектом регулирования контура скорости являются: механическая часть электродвигателя и контур тока с передаточной функцией:

$$W_0(p) = \frac{1}{(2 \cdot T_a \cdot p + 1) \cdot T_{\text{mex}} \cdot p}$$



Рис. 7. Структурная схема системы управления реактивным электродвигателем

Передаточную функцию регулятора скорости выбирают таким образом, чтобы обеспечить стандартную передаточную функцию контура скорости:

$$W_{\rm PC} = \frac{(2 \cdot T_q \cdot p + 1) \cdot T_{\rm Mex} \cdot p}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)}.$$

Полагаем $T_{\mu} = 2T_q$ и получим выражение передаточной функции регулятора тока в следующем виде:

$$W_{\rm PC} = \frac{T_{\rm Mex}}{4 \cdot T_q} = k_{\rm PC}$$

Пропорциональный регулятор скорости дает статическую ошибку, обусловленную нагрузкой. Если необходимо уменьшить ошибку, для обеспечения требований технологического процесса, применяется адаптивный регулятор скорости, подана заявка на изобретение [17]. На основании вышеизложенного алгоритма, была составлена и зарегистрирована программа для ЭВМ, которая позволяет осуществлять управление реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора [18].



Результаты моделирования электропривода с реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора.

Для моделирования пуска двигателя на холостом ходу (без нагрузки) с последующим набросом нагрузки была использована программная среда MatLab пакет Simulink. На рис. 8 изображена структурная схема, на рис. 9 приведены результаты моделирования. По результатам моделирования были получены электромеханические характеристики, сходные с двигателем постоянного тока.



Рис. 8. Структурная схема модели электропривода в программной среде MatLab



Рис. 9. Результаты моделирования пуска двигателя на холостом ходу с последующим набросом нагрузки

Выводы

Реактивный электродвигатель с анизотропной магнитной проводимостью ротора является наиболее перспективным для построения гребных электрических установок судов за счет высоких энергетических показателей, низких габаритов и высокой надежности. Управление реактивным электродвигателем может быть реализовано путем подачи на обмотки симметричной системы синусоидальных напряжений. В этом случае контроль выходных параметров осуществляется путем воздействия на параметры напряжения: амплитуду, частоту и угол сдвига начальной фазы напряжения относительно продольной оси магнитной симметрии. Если заданы амплитуда напряжения и частота, то реактивная машина развивает синхронный момент, величина которого



связана с углом сдвига начальной фазы напряжения относительно продольной оси магнитной симметрии. Если имеется датчик контроля положения осей магнитной симметрии ротора, то можно определить напряжения по осям магнитной симметрии *d*, *q* и сформировать электромагнитный момент так, чтобы обеспечить максимальную энергетическую эффективность или постоянство тока намагничивания. Управление при постоянном токе намагничивания обеспечивает большее быстродействие при формировании заданного значения электромагнитного момента. В результате моделирования электропривода можно сделать вывод о том, что построение замкнутой системы управления электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора позволяет обеспечить необходимые механические характеристики для построения привода гребной электрической установки. Введение дополнительных контуров управления током и скоростью приводит к уменьшению статической и динамической ошибки.

Работа была выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного контракта №14411.1879999.09.039 от 20.11.2014 г. между Министерством промышленности и торговли Российской Федерации и ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

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: Национальный 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. *Хватов О. С.* Гребная электрическая установка колесного судна / О. С. Хватов, Е. М. Бурда, Г. И. Коробко // Материалы Конгресса междунар. форума «Великие реки». — 2014. — С. 223–227.

5. *Ананьев С. С.* Асинхронный электропривод с улучшенными виброакустическими показателями / С. С. Ананьев, А. Н. Голубев // Электричество. — 2008. — № 8. — С. 52–56.

6. *Быков А. С.* Реверсивные режимы переменно-постоянного тока / А. С. Быков // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2. — С. 74–75.

7. *Григорьев А. В.* Судовые системы электродвижения на базе двигательно-движительных систем кольцевой конструкции / А. В. Григорьев, Ю. А. Кулагин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 164–169.

8. *Целуйко И. Г.* Развитие электродвижения военных флотов в мире / И. Г. Целуйко // Молодой ученый. — 2012. — № 4. — С. 54–57.

9. Протокол совместного заседания секции «Электротехническое оборудование» НП «НТС ЕЭС» и НТС АО «НТЦ ФСК ЕЭС» по теме «Разработка и внедрение вентильных электроприводов на основе вентильных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов» от 15 марта 2016 г. — Москва, 2016.

10. *Самосейко В. Ф.* Синхронные машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления / В. Ф. Самосейко, Ф. А. Гельвер, В. А. Хомяк, Д. А. Хайров; под ред. Самосейко В. Ф. — СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2016. —174 с.

11. *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.

12. 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.

13. *Григорьев М. А.* Система импульсно-векторного управления синхронным реактивным электродвигателем с независимым управлением по каналу возбуждения. / М. А. Григорьев, А. Н. Шишков, Е. В. Белоусов [и др.] // Научная дискуссия: вопросы технических наук. — 2015. — № 5–6. — С. 110–116.



14. *Глухенький Т. В.* Разработка и исследование бездатчиковых систем управления вентильно-индукторными электродвигателями: автореф. дис. ... канд. тех. наук / Т. В. Глухенький. — Чебоксары, 2004. — 19 с.

15. Исаков А. С. Синтез алгоритмов управления частотно-регулируемым электроприводом в условиях информационной неопределенности: дис. ... канд. тех. наук / А. С. Исаков. — СПб., 2009. — 140 с.

16. *Самосейко В. Ф.* Теоретические основы управления электроприводом: учеб. пособие / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.

17. Быстродействующий адаптивный регулятор частоты вращения электродвигателя // заявка на изобретение № 2015145548; заявл. 22.10.2015 / В. А. Хомяк, В. Ф. Самосейко, И. В. Гагаринов, С. И. Шарашкин.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663328 РФ. Программа для управления синхронной машиной с анизотропной магнитной проводимостью ротора с успокоительной обмоткой / В. А. Хомяк, В. Ф. Самосейко, С. В. Шарашкин, И. В. Белоусов, И. В. Гагаринов; заявитель и правообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Крыловский государственный научный центр». — № 2015660165; заяв. 26.10.2015; опубл. 20.01.2016.

REFERENCES

1. Grigor'ev, A. V. "Sudovaya sistema elektrodvizheniya novogo pokoleniya." Morskoi flot 2 (2012): 38-40.

2. Vasin, I. M. "Osobennosti sozdaniya grebnogo avtomatizirovannogo elektroprivoda dlya sudov s elektrodvizheniem ledovogo klassa." *Trudy VIII mezhdunarodnoi (XIX vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu 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, G. M. Minaev. "A frequency converter for a propelling electric motor." *Russian Electrical Engineering* 85.1 (2014): 45–52. DOI: 10.3103/S106837121401009X.

4. Khvatov, O. S., E. M. Burda, and G. I. Korobko. "Grebnaya elektricheskaya ustanovka kolesnogo sudna." Kongress Mezhdunarodnogo foruma «Velikie reki». 2014. 223–227.

5. Anan'ev, S. S., and A. N. Golubev. "Asinkhronnyi elektroprivod s uluchshennymi vibroakusticheskimi po-kazatelyami." *Elektrichestvo* 8 (2008): 52–56.

6. Bykov, A. S. "Reversing services of the alternating-direct current." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2 (2008): 74–75.

7. Grigor'ev, A. V., and Yu. A. Kulagin. "Theoretical basis of operation modes of ship shaft generator plants with frequency converters and synchronous compensators." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 164–169.

8. Tseluiko, I. G. "Razvitie elektrodvizheniya voennykh flotov v mire." Molodoi uchenyi 4 (2012): 54-57.

9. Protokol sovmestnogo zasedaniya sektsii «Elektrotekhnicheskoe oborudovanie» NP «NTS EES» i NTS AO «NTTs FSK EES» po teme «Razrabotka i vnedrenie ventil'nykh elek-troprivodov na osnove ventil'nykh dvigatelei s vozbuzhdeniem ot postoyannykh magnitov» ot 15 marta 2016 g. Moskva, 2016.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Glukhen'kii, T. V. Razrabotka i issledovanie bezdatchikovykh sistem upravleniya ventil'no-induktornymi elektrodvigatelyami. Abstract of PhD dis. Cheboksary, 2004.

15. Isakov, A. S. Sintez algoritmov upravleniya chastotno-reguliruemym elektroprivodom v usloviyakh informatsionnoi neopredelennosti. PhD diss. SPb., 2009.

16. Samoseiko, V. F. *Teoreticheskie osnovy upravleniya elektroprivodom: uchebnoe posobie.* SPb.: Elmor, 2007.



17. Khomyak, V. A., V. F. Samoseiko, I. V. Gagarinov and S. V. Sharashkin. RU 2015145548 A. The application for the invention. "Bystrodeistvuyustchiy adaptivnyi regulyanjh chastity vrastcheniya elektrodvigatelya". Russian Federation, stated 22.10.2015.

18. RU 2015663328. Khomyak, V. A., V. F. Samoseiko, S. V. Sharashkin, I. V. Belousov, and I. V. Gagarinov. Certificate of state registration of the computer program. "Programma dlya upravleniya sinkhronnoi mashinoi s anizotropnoi magnitnoi provodimo-st'yu rotora s uspokoitel'noi obmotkoi." Publ. 20 Jan. 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Самосейко Вениамин Франциевич —	Samoseiko, Veniamin F. —
доктор технических наук, профессор	Dr. of Technical Sciences, professor
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени	Admiral Makarov State University
адмирала С. О. Макарова»	of Maritime and Inland Shipping
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,	5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
ул. Двинская, 5/7	Russian Federation
e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru,	e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru,
samoseyko@mail.ru	samoseyko@mail.ru
Шарашкин Сергей Владимирович — аспирант	Sharashkin, Sergei V. — Postgraduate
Научный руководитель:	Supervisor:
Самосейко Вениамин Францевич	Samoseiko, Veniamin F.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени	Admiral Makarov State University
адмирала С. О. Макарова»	of Maritime and Inland Shipping
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,	5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
ул. Двинская, 5/7	Russian Federation
e-mail: s_sharashkin@mail.ru	e-mail: s_sharashkin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 марта 2017 г. Received: March 10, 2017.