

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.24143/2073-1574-2017-3-80-86
УДК 621.3.078

В. Ф. Самосейко, С. В. Шарашкин

НАСТРОЙКА ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА РЕАКТИВНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С АНИЗОТРОПНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ РОТОРА

Разработан алгоритм настройки датчика положения ротора реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Рассматриваются основные достоинства и недостатки синхронных электрических машин при построении систем электродвижения судов. Отмечаются преимущества реактивных электрических машин с анизотропной магнитной проводимостью ротора при построении гребных электрических установок. Раскрывается сущность метода настройки датчика положения ротора. Получено дифференциальное уравнение настройки датчика угла положения ротора, исследована его устойчивость. Рассмотрена модель реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора, позволяющая определять ее параметры.

Ключевые слова: реактивная электрическая машина, анизотропная магнитная проводимость, настройка датчика положения ротора, математическая модель.

Введение

В настоящее время вопрос построения систем электродвижения судов является актуальным, при этом все чаще разработчики отдают предпочтение в выборе приводного электродвигателя синхронным электрическим машинам, поскольку этот тип двигателей является наиболее перспективным [1–3]. В настоящее время синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов обладают наилучшими энергетическими характеристиками и наименьшими габаритами [4, 5]. Тем не менее, они имеют ряд недостатков, таких как невозможность снятия магнитного поля с ротора, что приводит к аварийным ситуациям; необходимость обеспечения защиты от металлической пыли, которая притягивается к ротору и может привести к заклиниванию ротора и искажению симметрии магнитной системы.

Существуют синхронные реактивные двигатели с анизотропной магнитной проводимостью ротора (РЭМ с АМПР), которые не уступают машинам с постоянными магнитами в энергетических характеристиках и массогабаритных показателях, помимо этого данный тип машин обладает пассивным ротором, который не нуждается в дополнительном охлаждении и не обладает собственным магнитным полем, что исключает недостатки вышеописанных машин [6–9].

При реализации системы электродвижения на базе любого типа синхронных машин необходимо использовать инкрементальный энкодер, поскольку при формировании алгоритма управления двигателем в систему управления требуется вносить информацию о положении ротора. При этом точность положения играет важную роль, ошибка измерения положения ротора более 5 % приводит к невозможности управления двигателем. Отсюда следует, что настройка инкрементального энкодера является важной задачей при построении системы управления [10–13].

Настоящая статья посвящена вопросу автоматической настройки датчика положения ротора.

Автоматическая настройка датчика угла положения ротора

В данном разделе рассматривается процедура автоматической настройки датчика положения ротора с использованием уравнений напряжения

$$\begin{aligned} u_d &= R_1 i_d - \omega L_q i_q + L_d p i_d; \\ u_q &= R_1 i_q + \omega L_d i_d + L_q p i_q \end{aligned}$$

при вращении ротора, где u_d, u_q – элементы вектора напряжений статора; R_1 – сопротивление статорных обмоток; i_d, i_q – элементы вектора токов статора; ω – угловая частота сети питающего напряжения; L_d, L_q – полная продольная и поперечная индуктивности машины по осям координат d, q ; p – оператор дифференцирования. Будем полагать, что положение углов

$$\alpha_A = \frac{\varepsilon\pi}{m} A + \alpha \quad (1)$$

(где ε – коэффициент, учитывающий число фаз m ($\varepsilon = 1$ при четном m и $\varepsilon = 2$ при нечетном m); A – порядковый номер фазы ($A = 0, 2, \dots, m - 1$)) относительно продольной оси ротора d известны с точностью до некоторого угла настройки датчика положения $\alpha \neq 0$. Угол настройки датчика положения α будем рассматривать как функцию времени t .

Полярные углы α_A фазных обмоток статора определяются соотношением (1).

Суть метода настройки состоит в сравнении результатов наблюдений токов машины с результатами расчетов токов по модели, синтезе дифференциального уравнения настройки, решение которого в реальном времени позволяет найти начальный угол датчика положения ротора. Иллюстрация алгоритма настройки датчика приведена на рис. 1.

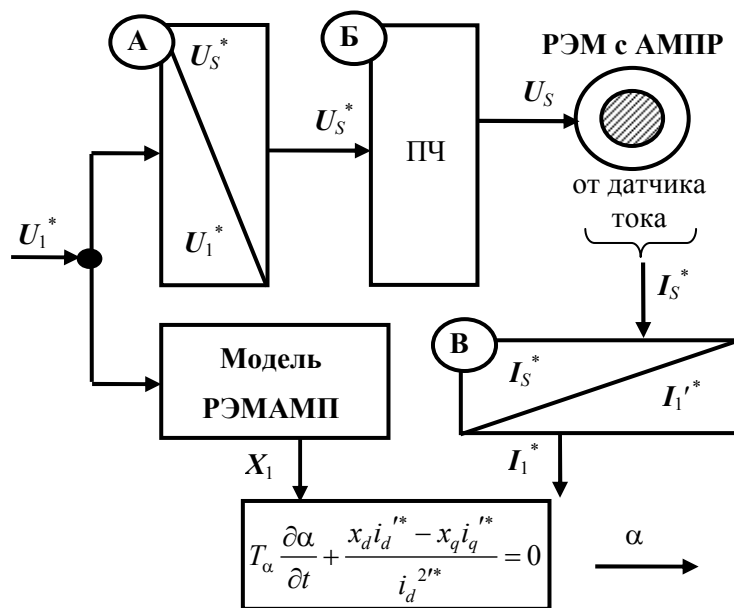


Рис. 1. Алгоритм настройки датчика угла положения ротора:

А – алгоритм преобразования координат; Б – преобразователь частоты;

В – алгоритм решения дифференциального уравнения настройки угла положения ротора; x_d, x_q – элементы вектора X_1 ; i_d^*, i_q^* – элементы вектора I_1^* ; T_α – постоянная времени; t – время; U_S^* – вектор напряжений статора в естественных координатах; U_1^* – в координатах d-q.

Вектор токов с датчиков I_S^* отображается на плоскость поперечного сечения машины согласно преобразованию координат:

$$I_1'^* = D_S(a) \cdot I_S^*,$$

где D_S – фазная матрица. Так как угол положения оси ротора α неизвестен, то токи $I_1'^*$ будут функциями угла α , отсчитываемого от продольной оси ротора d . Для управления реактивной машиной необходимо, чтобы $\alpha = 0$. При $\alpha = 0$ вектор отображений токов статора на плоскость поперечного сечения машины будет определяться выражением

$$I_1^* = D_S(0) \cdot I_S^*.$$

Информация об элементах этого вектора необходима для управления реактивной машиной. Так как угол положения оси ротора α неизвестен, то неизвестен вектор токов I_1^* . Связь векторов токов

$$I_1' = \begin{bmatrix} i_d' \\ i_q' \end{bmatrix} \text{ и } I_1 = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$

определена выражением

$$I_1' = V(\alpha) \cdot I_1 = V(\alpha) \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \cdot \cos(\theta_I - \alpha) \\ i_a \cdot \sin(\theta_I - \alpha) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $V(\alpha)$ – матрица вращения; i_a – амплитудное значение тока.

Для получения информации о токе $I_1'^*$ воспользуемся уравнениями напряжений реактивной машины (1), которые перепишем в следующем виде:

$$U_1^* = R_1 \cdot X_1 + \omega \cdot E \cdot L_{01} \cdot X_1 + L_{01} \cdot pX_1, \quad (3)$$

где R_1 – отображение сопротивления обмотки статора на плоскость поперечного сечения машины; L_{01} – матрица полных индуктивностей обмотки статора; X_1 – отображение вектора токов статора на плоскость поперечного сечения машины, полученное в результате решения уравнения в реальном времени; $E = V(\pi/2)$.

Если предположить, что математическая модель машины, представленная уравнениями напряжений реактивной машины, полностью совпадает с самой машиной, то

$$X_1 = I_1 = \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}.$$

Составим функции рассогласования векторов токов $I_1'^*$ и $I_1^* = X_1$:

$$f_\alpha(\alpha) = \frac{x_d i_d'^* - x_q i_q'^*}{i_d'^{2*}}.$$

Используя введенную функцию рассогласования токов, запишем дифференциальное уравнение настройки датчика угла положения ротора:

$$T_\alpha \frac{\partial \alpha}{\partial t} + f_\alpha(\alpha) = 0, \quad (4)$$

где T_α – постоянная времени уравнения настройки датчика угла положения ротора.

Используя связь векторов токов $I_1'^*$ и I_1^* , определенную выражением (2), функцию рассогласования векторов $I_1'^*$ и I_1^* запишем в следующем виде:

$$f_\alpha(\alpha) = \sin(\alpha) \left(1 + \left(\frac{x_d}{x_q} \right)^2 \right). \quad (5)$$

Тогда дифференциальное уравнение (4) примет следующий вид:

$$T_\alpha \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \sin(\alpha) = 0. \quad (6)$$

Из данного уравнения следует, что неподвижной точкой данного уравнения является значение $\alpha = 0$. Если неподвижная точка $\alpha = 0$ дифференциального уравнения (4) устойчива, то решение уравнения (3) в реальном времени приведет к настройке датчика угла положения ротора.

Исследуем устойчивость решения данного уравнения, полагая, что $I_1^* = X_1$. Для этого разложим функцию рассогласования векторов I_1^* и I_1^* , определенную выражением (5), в ряд Маклорена с точностью до первого члена:

$$f(\alpha) \approx \alpha \left(1 + \left(\frac{x_d}{x_q} \right)^2 \right).$$

Дифференциальное уравнение (6) заменим дифференциальным уравнением

$$T_\alpha \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \alpha = 0.$$

Корень характеристического уравнения данного дифференциального уравнения

$$p = -\frac{1}{T_\alpha}$$

будет всегда отрицательным. Следовательно, неподвижная точка $\alpha = 0$ дифференциального уравнения (4), согласно теоремам Ляпунова об устойчивости решений дифференциальных уравнений, устойчива.

Дифференциальное уравнение (5) имеет решение

$$\alpha(t) = 2 \arctan \left(\tan \left(\frac{\alpha(0)}{2} \right) \exp \left(-\frac{t}{T_\alpha} \right) \right),$$

где $\alpha(0)$ – начальное значение угла положения ротора. Вид функций решения дифференциального уравнения (5) при различных начальных значениях угла настройки положения ротора приведен на рис. 2.

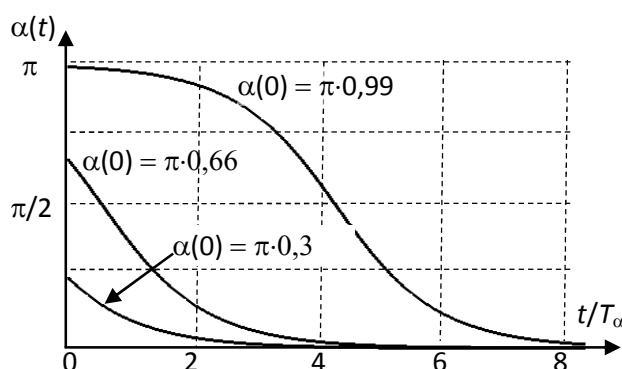


Рис. 2. Вид функций решения дифференциального уравнения (4) при различных начальных значениях угла настройки положения ротора

Постоянная времени дифференциального уравнения (4) настройки датчика угла положения ротора T_α может быть выбрана достаточно малой. Однако при существенном отличии параметров модели от параметров машины выбор малого значения T_α может привести к потере устойчивости управления реактивной машиной.

Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о том, что решение дифференциального уравнения настройки датчика угла положения ротора (4) в режиме реального времени позволяет автоматически настраивать датчик положения ротора.

Заключение

В работе изложена суть метода настройки датчика положения ротора, этот метод позволяет обеспечивать высокую точность настройки в режиме реального времени и поддержание высокой точности регулирования частоты вращения и положения ротора.

Получено дифференциальное уравнение настройки датчика угла положения ротора. В ходе исследования установлено, что уравнение является устойчивым.

Приведенная модель реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора позволяет определять ее параметры, благодаря чему возможно отслеживать положение ротора электрической машины во время ее работы.

Предложенные алгоритмы настройки датчика положения ротора являются эффективными и обеспечивают необходимую точность получаемой информации об угле поворота ротора для построения систем электродвижения судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Судовая система электродвижения нового поколения // Морской флот. 2012. № 2. С. 38–40.
2. Васин И. М. Особенности создания гребного автоматизированного электропривода для судов с электродвижением ледового класса // Тр. VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск: Национ. исслед. Мордов. гос. ун-т им. Н. П. Огарёва, 2014. С. 458–462.
3. Мустафа Г. М., Волков С. В., Ершов А. А., Сеннов Ю. М., Минаев Г. М. Преобразователь частоты для гребного электродвигателя // Электротехника. 2014. № 1. С. 46–53.
4. Григорьев М. А., Шишков А. Н., Белоусов Е. В., Сычев Д. А., Меньшенин А. С., Хаятов Е. С. Система импульсно-векторного управления синхронным реактивным электродвигателем с независимым управлением по каналу возбуждения // Научная дискуссия: вопросы технических наук. 2015. № 5–6. С. 110–116.
5. Григорьев А. В., Глеклер Е. А. Перспективная судовая единая электроэнергетическая установка // Эксплуатация морского транспорта. 2008. № 3. С. 68–70.
6. Самосейко В. Ф., Гельвер Ф. А. и др. Синхронные машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления / под ред. Самосейко В. Ф. СПб.: Крылов. гос. науч. центр, 2016. 174 с.
7. Hofmann H. H., Sanders S. R. High-speed synchronous reluctance machine with minimized rotor losses // IEEE Transactions on Industry Applications. 2000. Vol. 36. Iss. 2. Pp. 531–539. DOI: 10.1109/28.833771.
8. Пат. 2603200 Российская Федерация, МПК Н 02 К 1/24, Н 02 К 37/04. Синхронный электрический двигатель с анизотропной магнитной проводимостью ротора / Хомяк В. А., Самосейко В. Ф., Шарашкин С. В., Гельвер Ф. А.; № 2015140439/07; заявл. 22.09.2015; опубл. 27.11.2016; бюл. № 33.
9. Самосейко В. Ф., Шарашкин С. В. Управление гребным реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Вестн. Гос. ун-та мор. и речн. флота им. адм. С. О. Макарова. 2017. Т. 9. № 2. С. 390–401.
10. Исаков А. С. Синтез алгоритмов управления частотно-регулируемым электроприводом в условиях информационной неопределенности: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009. 140 с.
11. Безгин А. С., Греков Э. Л. Применение инкрементального энкодера как датчика скорости в цифровых системах управления экскаваторного электропривода переменного тока // Науч.-техн. вестн. Поволжья. 2013. № 3. С. 72–76.
12. Anuchin A., Dianov A., Shpak D., Astakhova V., Fedorova K. Speed estimation algorithm with specified bandwidth for incremental position encoder. 17th International Conference on Mechatronics – Mechatronika 2016 (ME) (Prague, Czech Republic, December 7–9, 2016). Prague, 2016. Pp. 1–6.
13. Ichikawa S., Zhiqian Ch., Tomita M., Doki S., Okuma S. Sensorless control of an interior permanent magnet synchronous motor on the rotating coordinate using an extended electromotive force. Industrial Electronics Society, 2001. IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE (Denver, CO, 2001). Denver, 2001. Vol. 3. Pp. 1667–1672.

Статья поступила в редакцию 11.05.2017

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Самосейко Вениамин Францевич – Россия, 198035, Санкт-Петербург; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; г-р техн. наук, профессор; профессор кафедры электропривода и электрооборудования береговых установок; samoseyko@mail.ru.

Шарашкин Сергей Владимирович – Россия, 198035, Санкт-Петербург; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; аспирант кафедры электропривода и электрооборудования береговых установок; s_sharashkin@mail.ru.



V. F. Samoseyko, S. V. Sharashkin

**ADJUSTMENT OF THE POSITION SENSOR
OF THE ROTOR OF THE SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR
WITH ANISOTROPIC MAGNETIC CONDUCTIVITY OF THE ROTOR**

Abstract. The article is devoted to the development of the algorithm for adaptation the rotor position sensor of a synchronous reluctance electric machine with anisotropic magnetic conductivity of the rotor. The main advantages and disadvantages of synchronous electric machines are considered in the construction of ship propulsion systems. The advantages of reluctance motor with anisotropic magnetic conductivity of the rotor are given in the construction of propulsion systems. The essence of the method of adaptation of the rotor position sensor is given. The differential equation of adaptation of the rotor position angle sensor is obtained, its stability is investigated. A model of a reluctance machine with anisotropic magnetic conductivity of a rotor is given, which makes it possible to determine its parameters.

Key words: synchronous reluctance motor, anisotropic magnetic conductivity, adaptation of the rotor position sensor, mathematical model.

REFERENCES

1. Grigor'ev A. V. Sudovaia sistema elektrodvizheniia novogo pokoleniia [The ship electromotor system of the new generation]. *Morskoi flot*, 2012, no. 2, pp. 38-40.
2. Vasin I. M. Osobennosti sozdaniia grebnogo avtomatizirovannogo elektroprivoda dlia sudov s elektrodvizheniem ledovogo klassa [Characteristics of the propulsion electric motor on ice-class ships]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014*. Saransk, Natsional'nyi issledovatel'skii Mordovskii gosudarstvennyi universitet im. N. P. Ogareva, 2014. Pp. 458-462.
3. Mustafa G. M., Volkov S. V., Ershov A. A., Sennov Iu. M., Minaev G. M. Preobrazovatel' chastoty dlia grebnogo elektrodvigatelia [A frequency converter for the propulsion electric motor]. *Elektrotehnika*, 2014, no. 1, pp. 46-53.
4. Grigor'ev M. A., Shishkov A. N., Belousov E. V., Sychev D. A., Men'shenin A. S., Khaiatov E. S. Sistema impul'sno-vektornogo upravleniia sinkhronnym reaktivnym elektrodvigatelem s nezavisimym upravleniem po kanalu vozbuzhdeniia [Pulse-vector control system of the field regulated reluctance machine]. *Nauchnaia diskussii: voprosy tekhnicheskikh nauk*, 2015, no. 5-6, pp. 110-116.
5. Grigor'ev A. V., Glekler E. A. Perspektivnaia sudovaia edinaia elektroenergeticheskaia ustanovka [The perspective ship integrated electric power system]. *Ekspluatatsiia morskogo transporta*, 2008, no. 3, pp. 68-70.
6. Samoseyko V. F., Gel'ver F. A. i dr. *Sinkhronnye mashiny s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora. Metodika proektirovaniia. Algoritmy upravleniia* [Synchronous machines with anisotropic magnetic conductivity of rotor. Design procedure. Algorithms of control]. Pod redaktsiei Samoseyko V. F. Saint-Petersburg, Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2016. 174 p.
7. Hofmann H. H., Sanders S. R. High-speed synchronous reluctance machine with minimized rotor losses. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, vol. 36, iss. 2, pp. 531-539. DOI: 10.1109/28.833771.
8. Khomiak V. A., Samoseyko V. F., Sharashkin S. V., Gel'ver F. A. *Sinkhronnyi elektricheskii dvigatel' s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora* [A synchronous electric motor with an anisotropic magnetic conductivity of rotor]. Patent RF, no. 2603200, 27.11.2016.

9. Samoseiko V. F., Sharashkin S. V. Upravlenie grebnym reaktivnym elektrodvigatelem s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Control of the reluctance motor with an anisotropic magnetic conductivity of rotor]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 390-401.

10. Isakov A. S. *Sintez algoritmov upravleniia chastotno-reguliruemym elektroprivodom v usloviakh informatsionnoi neopredelennosti. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Processing algorithms of control of a frequency-regulated electric motor in the context of information uncertainty. Diss. ...Cand.Tech.Sci.]. Saint-Petersburg, 2009. 140 p.

11. Bezgin A. S., Grekov E. L. Primenenie inkremental'nogo enkodera kak datchika skorosti v tsifrovyykh sistemakh upravleniia ekskavatornogo elektroprivoda peremennogo toka [Using an incremental encoder as a velocity sensor in digital control systems of an excavator AC motor]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2013, no. 3, pp. 72-76.

12. Anuchin A., Dianov A., Shpak D., Astakhova V., Fedorova K. Speed estimation algorithm with specified bandwidth for incremental position encoder. *17th International Conference on Mechatronics – Mechatronika 2016 (ME) (Prague, Czech Republic, December 7-9, 2016)*. Prague, 2016. Pp. 1-6.

13. Ichikawa S., Zhiqian Ch., Tomita M., Doki S., Okuma S. Sensorless control of an interior permanent magnet synchronous motor on the rotating coordinate using an extended electromotive force. *Industrial Electronics Society, 2001. IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE (Denver, CO, 2001)*. Denver, 2001, vol. 3, pp. 1667-1672.

The article submitted to the editors 11.05.2017

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Samoseyko Veniamin Frantsevich – Russia, 198035, Saint-Petersburg; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Shore Installations; samoseyko@mail.ru.

Sharashkin Sergey Vladimirovich – Russia, 198035, Saint-Petersburg; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; Postgraduate Student of the Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Shore Installations; s_sharashkin@mail.ru.

