

НАСЫЩЕНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ БЕЗДАТЧИКОВОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА

Аннотация

В данной статье рассмотрено влияние насыщения железа на угловое положение ротора при его определении бездатчиковым методом. Приведены недостатки использования механических датчиков в системах электродвигателей. Рассмотрены преимущества бездатчикового контроля синхронным двигателем. Приведены магнитные характеристики, показывающие зависимость потокосцеплений по осям dq от тока этих же осей. Обнаружено отклонение потокосцепления по оси d , при равенстве тока этой оси нулю. Данное отклонение объяснено математически с помощью баланса напряжения. Рассмотрено перекрестное насыщение. Его суть заключается в том, что при увеличении уровня насыщения железа и для некоторых конфигураций ротора поток одной оси зависит, главным образом, от соответствующего тока этой же оси и, во-вторых, от тока другой оси. Представлено его математическое описание. В заключении приведены выводы о возможности компенсации и учета насыщений.

Ключевые слова: насыщение железа, перекрестное насыщение, угловое положение ротора, вектор потокосцепления, бездатчиковое управление.

Abstract

In this article considered the influence of saturation of iron on the angular position of the rotor in its definition sensorless method. The disadvantages of using mechanical sensors in electric motors are given. The advantages of sensorless control of synchronous motor are considered. Magnetic characteristics showing the dependence on the flux linkages from the dq -axis current of the same axes are showed. A deviation of flux along the axis d , with equal power to that axis to zero is indentified. This deviation is explained mathematically by a balance of tension. Cross-saturation is considered. Its essence lies in the fact that by increasing the level of iron saturation and for certain configurations of the rotor, a flow axis depends mainly on the current corresponding to this same axis, and secondly, on the other axis current. Mathematical description is submitted. In conclusion the findings of the possibility of compensation and allowance for saturation are viewed.

Keywords: iron saturation, cross saturation, the angular position of the rotor, fluxlinkage vector, sensorless control.

В настоящее время при использовании замкнутых контуров электродвигателей в качестве параметра обратной связи чаще всего используется угловое положение ротора. Для его определения применяются специальные датчики углового положения, имеющие определенные недостатки, среди которых самый значимый – это невозможность использования меха-

нических датчиков при определенных процессах [1]. Поэтому просматривается тенденция к отказу от них, что позволит:

- повысить надежность системы электропривода;
- снизить стоимость привода;
- улучшить массогабаритные показатели;

– при определении скорости путем дифференцирования угла поворота помехи могут существенно повлиять на процесс управления. Отсутствие механического датчика определения положения позволит это избежать [2].

В большинстве моделей существующих бездатчиковых методов не учитывается насыщение двигателя, которое оказывает влияние на процесс демодуляции сигнала. Целью данной статьи является рассмотрение магнитной насыщаемости железа и ее влияние на угловое положение и потокосцепление ротора.

При наличии насыщения железа взаимосвязи магнитного потока и тока (магнитные характеристики) для dq осей не могут быть выражены через линейные уравнения и постоянные значения индуктивности. Они предполагают наличие более сложных связей с перекрестными эффектами насыщения (cross effects saturation) между током оси d и потока по оси q (и наоборот) [3]. Если пренебречь эффектом насыщения, то магнитные характеристики могут быть описаны с помощью уравнений (1)–(2):

$$\Psi_d(i_d) = \Psi_{max} + \Psi_{d,i}(i_d), \quad (1)$$

$$\Psi_q(i_q) = \Psi_{q,i}(i_q). \quad (2)$$

В данном случае потокосцепление синхронного двигателя по оси d отождествляется с потокосцеплением холостого хода этой же оси $\Psi_{max} = \Psi_d(0)$.

На рис. 1 приведен пример магнитных характеристик. В частности, на рис. 1, *а* показана зависимость потокосцепления по оси d от тока по этой же оси. На рис. 1, *б* представлена их же зависимость, но по оси q . Из сравнения этих графиков очевидно, что на рис. 1, *а* при нулевом токе I_d , потокосцепление не равно нулю, а равно значению Ψ_{max} .

Для оси q все выглядит наоборот. При нулевом значении тока q , вектор потокосцепления так же равен нулю. В этом случае зависимость потокосцепления от тока симметрична для положительных и отрицательных значений тока, т. е. $\Psi_{q,i}(i_q) = -\Psi_{q,i}(-i_q)$.

При насыщении железа баланс напряжения может быть представлен:

$$u_d(t) = R_s i_d(t) + \frac{d\Psi_d(i_d(t))}{dt} - w_{эл} \Psi_q(i_q(t)); \quad (3)$$

$$u_q(t) = R_s i_q(t) + \frac{d\Psi_q(i_q(t))}{dt} + w_{эл} \Psi_d(i_d(t)). \quad (4)$$

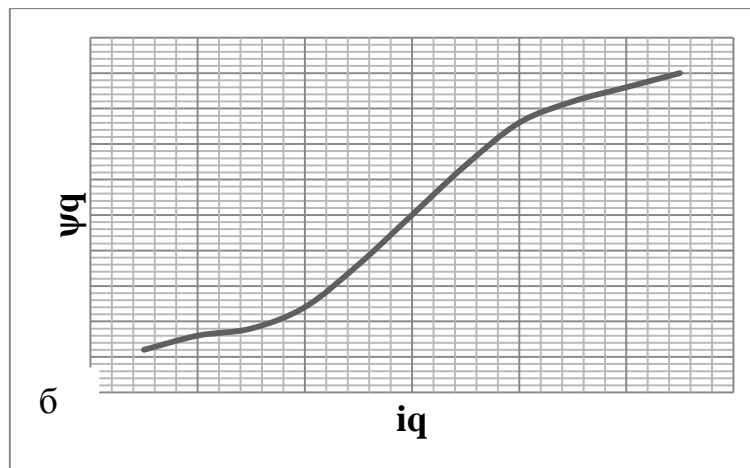
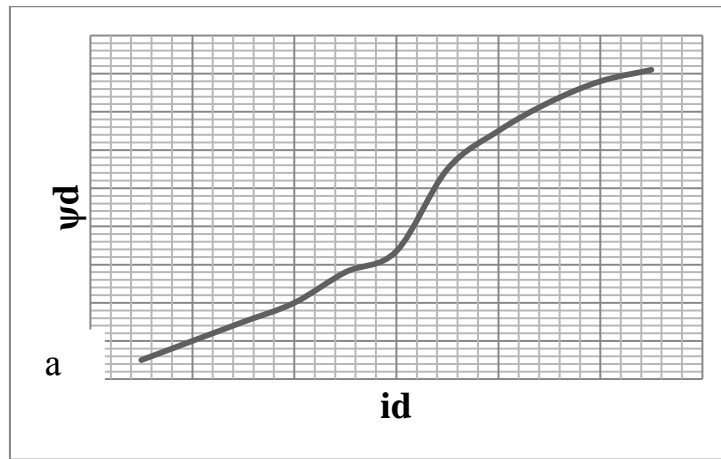


Рис. 1. Магнитные характеристики: *a* – по оси *d*, *б* – по оси *q*

Раскроем производные, тогда будем иметь:

$$u_d(t) = R_s i_d(t) + \tilde{L}_d(i_d) \frac{di_d(t)}{dt} - w_{эл} L_q(i_q) i_q(t); \quad (5)$$

$$u_q(t) = R_s i_q(t) + \tilde{L}_q(i_q) \frac{di_q(t)}{dt} + w_{эл} L_d(i_d) i_d(t). \quad (6)$$

Что касается крутящего момента, он может быть выражен следующим образом:

$$M(i_d, i_q) = \frac{3}{2} p (\Psi_d(i_d) i_q - \Psi_q(i_q) i_d). \quad (7)$$

Однако в реальном синхронном двигателе на потокосцепление и угловое положение оказывает весомое влияние еще одна разновидность насыщения, называемая перекрестным насыщением.

Перекрестному насыщению уделяется достаточно большое внимание в работах [3; 4–7]. При увеличении уровня насыщения железа и для некоторых конфигураций ротора поток одной оси зависит, главным образом, от соответствующего тока этой же оси и, во-вторых, от тока другой оси. Такое явление получило название перекрестного насыщения.

Его можно описать с помощью следующих уравнений:

$$\Psi_d = \Psi_d(i_d, i_q); \quad (8)$$

$$\Psi_q = \Psi_q(i_d, i_q). \quad (9)$$

Магнитные пути потоков продольной и поперечной осей статора или ротора не изолированы друг от друга. Следовательно, степень насыщения в каждом элементе будет определяться равнодействующей потоков обеих осей.

Перекрестное насыщение связано с насыщением участков магнитной цепи, общих для d и q оси. Действительно, насыщение одной из этих частей за счет одного тока определяет изменение потока в другой оси, даже если ток последнего остается постоянным. В таких условиях баланс напряжений можно записать следующим образом:

$$U_d(t) = R_s i_d(t) + \frac{d\Psi_d(i_d(t), i_q(t))}{dt} - w_{эл} \Psi_q(i_d(t), i_q(t)) = R_s i_d(t) + \tilde{L}_d(i_d(t), i_q(t)) \frac{di_d(t)}{dt} + \tilde{L}_{Mdq}(i_d, i_q) \frac{di_q(t)}{dt} - w_{эл} \Psi_q(i_d(t), i_q(t)); \quad (10)$$

$$U_q(t) = R_s i_q(t) + \frac{d\Psi_q(i_d(t), i_q(t))}{dt} + w_{эл} \Psi_d(i_d(t), i_q(t)) = R_s i_q(t) + \tilde{L}_q(i_d(t), i_q(t)) \frac{di_q(t)}{dt} + \tilde{L}_{Mdq}(i_d, i_q) \frac{di_d(t)}{dt} + w_{эл} \Psi_d(i_d(t), i_q(t)). \quad (11)$$

В данном случае учитываем, что

$$\tilde{L}_d(i_d, i_q) = \frac{d\Psi_d(i_d, i_q)}{di_d}; \quad (12)$$

$$\tilde{L}_q(i_d, i_q) = \frac{d\Psi_q(i_d, i_q)}{di_q}. \quad (13)$$

При этом стоит учитывать, что производная потокосцепления q по току d равна производной потокосцепления d по току q , а все это составляет взаимоиндукцию по осям dq , т. е. это можно записать:

$$\tilde{L}_{Mdq}(i_d, i_q) = \frac{d\Psi_d(i_d, i_q)}{di_q} = \frac{d\Psi_q(i_d, i_q)}{di_d} = \tilde{L}_{Mqd}(i_d, i_q). \quad (14)$$

Таким образом, насыщение железа и перекрестное насыщение необходимо учитывать в реальных системах, т. к. оно оказывает влияние на потокосцепление, что приводит к отклонению углового положения от ранее теоретически просчитанного. Для того чтобы избежать влияния перекрестного насыщения, в физической модели бездатчикового определения угло-

вого положения синхронного двигателя необходимо предусмотреть компенсатор. Стоит отметить, что влияние рассматриваемых насыщений незначительно и в случае использования синхронного двигателя в системах, которым не требуется высокая точность, возможно отсутствие компенсирующего устройства.

Список использованных источников

1. Басков С. Н., Лицин К. В. Высокочастотная инжекция сигналов при бездатчиковом методе определения углового положения ротора // Электронный журнал «Машиностроение». – 2013. № 1. С. 28–34. <http://indust-engineering.ru/>
2. Басков С. Н., Лицин К. В. Принцип векторно-импульсного управления электродвигателями переменного тока // Вестник Южно-Уральского государственного университета «Энергетика». – 2013. – 13 том. №1. – С. 92–95.
3. Adriano Faggion Algorithms and Rotor Designs for the Position Estimation of PM Synchronous motors at Zero and Nonzero Speed. Universiteta degli studi di Padova. 2011.
4. Filho and E. Avolio, "Dynamic Simulation of an Induction Motor Fed from an Isolated Synchronous Generator", Proc. of th Intemational Conference in Electrical Machine, Pisa, Italy, September 12–14, 1988/
5. Levi E. A Unified Approach to main Flux Saturation Modeling in d-q Axis Models of Induction Machines, ibid. 1995. Vol.EC-10(3). Pp. 455–461.
6. Басков С. Н., Лицин К. В., Коньков А. С., Черкас Т. В. Исследование положения вектора потокоцепления ротора при векторно-импульсном пуске // Вестник Южно-Уральского государственного университета "Энергетика" [Текст] / ФГБОУ ВПУ "ЮУрГУ" (НИИ). – Челябинск: Издат.центр ЮУрГУ. – 2012. – Вып.18. – №37 (296). – ISSN 1990–8512. С. 68–72.
7. Al-bahooth M. A. Analysis of Transient Phenomena Associated with Saturated Three Phase Induction Motor. Msc thesis, King Saud University, Saudia Arabia, 1999.

УДК 669-042

А. В. Лозович, С. О. Джимо

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ПЕРИФЕРИЙНОЙ ЗОНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Аннотация

Целью выполненного исследования являлась разработка методов моделирования теплообмена в периферийной зоне доменной печи. Модель позволяет оценить влияние рудной нагрузки, гранулометрического состава железорудных материалов на развитие процессов теплообмена и восстановительной работы газового потока периферийной зоны доменной печи.