

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

DOI: 10.24412/2077-8481-2023-4-76-83

УДК 621.3.083.1

О. А. КАПИТОНОВ

А. С. ТРЕТЬЯКОВ

Г. С. ЛЕНЕВСКИЙ, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Аннотация

Произведен анализ существующих вариантов реализации наблюдателя скорости вращения ротора для асинхронного электродвигателя. Показана необходимость разработки математической модели асинхронного электродвигателя с учетом эффектов вытеснения тока в стержневой обмотке ротора и потерь в магнитопроводе статора. Такая модель может быть использована для уточненного моделирования работы идентификатора параметров схемы замещения и наблюдателя скорости. Показано, что для достижения высокой точности работы наблюдателя необходимо введение коррекции параметров роторной цепи по нелинейному закону.

Ключевые слова:

асинхронный электродвигатель, схема замещения, идентификация параметров, предварительная идентификация, текущая идентификация, метод разностных уравнений.

Для цитирования:

Капитонов, О. А. Уточненная методика построения наблюдателя скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя / О. А. Капитонов, А. С. Третьяков, Г. С. Ленецкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 76–83.

Введение

В настоящее время наблюдается непрерывное развитие цифровых систем управления силовыми преобразователями в автоматизированном электроприводе. В таких системах происходит постоянная обработка поступающей с датчиков информации и выработка управляющих воздействий для поддержания скорости вращения электродвигателя, или других параметров технологического процесса.

Информация, поступающая в систему управления технологическим процессом, не всегда может быть получена явно. Часть необходимых системе управления величин можно получить

только косвенно, без прямого измерения. Одним из примеров может служить работа преобразователей частоты в замкнутой по скорости системе управления при поддержании скорости вращения на постоянном уровне, без использования датчика скорости. Данная задача может решаться с помощью алгоритма (модели), носящего название «наблюдатель состояния».

Наблюдатель состояния – это модель, подключенная параллельно к объекту управления и получающая непрерывную информацию об изменениях регулирующего воздействия и регулирующей величины.

Существует большое количество разновидностей наблюдателей состоя-

ния, объединенных наличием электромагнитной модели асинхронного электродвигателя, лежащей в их основе. Для точной работы наблюдателей крайне важно знать точные значения активных и реактивных сопротивлений Т- или Г-образной схемы замещения асинхронного электродвигателя. Для решения этой задачи есть другой класс моделей – идентификаторы параметров схемы замещения.

Идентификатор параметров схемы замещения – это алгоритм, который на основе специально сформированного сигнала напряжения, поданного на одну из фаз асинхронного электродвигателя, достаточно быстро и точно определяет параметры схемы замещения.

Основной недостаток таких алгоритмов – это использование постоянных по величине параметров схемы замещения.

Цель работы – разработка электромагнитной модели, учитывающей:

- зависимость активных и индуктивных сопротивлений схемы замещения асинхронного электродвигателя от скольжения;
- потери в стали;
- эффект вытеснения тока ротора.

Описание электромагнитной модели асинхронного электродвигателя

Для исследования работы предлагаемого наблюдателя состояния методом компьютерного моделирования разработана уточненная модель асинхронного электродвигателя в осях $\alpha - \beta$, $d - q$ [1]. Такая модель была выбрана для того, чтобы иметь возможность учета эффекта вытеснения тока в стержневой обмотке ротора, поскольку в данной модели, в отличие от более распространенных моделей с неподвижным ротором, частота тока роторной цепи изменяется при изменении как величины скольжения, так и частоты приложенного к статору напряжения, и соответствует частоте тока ротора у

реального электродвигателя. Эта особенность предлагаемой модели дает возможность реализации зависимостей величин приведенного сопротивления ротора и индуктивности рассеивания роторной цепи от значения частоты тока роторной цепи, при питании статора напряжением переменной частоты, а также при питании напряжением несинусоидальной формы. В таком случае роторная цепь в предлагаемой модели будет иметь различную величину активного и индуктивного сопротивлений для каждой из гармоник тока несинусоидальной формы, в соответствии с их частотой. Недостатком предлагаемой модели электродвигателя является сложность решения системы дифференциальных уравнений с изменяющимися по периодическому закону параметрами. В этой связи использование данной системы уравнений предлагается для применения в методах компьютерного моделирования путем численного интегрирования. В [2] представлен математический аппарат зависимости активных и индуктивных сопротивлений схемы замещения асинхронного электродвигателя от скольжения, учета потерь в стали, и эффекта вытеснения тока в роторе. В текущей версии электромагнитной модели математическое описание эффекта вытеснения тока в роторе доработано на основе методики, предложенной в [3]. Система уравнений, описывающая электромагнитные процессы асинхронного электродвигателя с учетом вышеназванных условий, имеет вид

$$u_{\alpha} = i_{\alpha} R_1 + L_{1\mu} \frac{di_{\alpha}}{dt} + \frac{d\Psi_{m\alpha}}{dt};$$

$$u_{\beta} = i_{\beta} R_1 + L_{1\mu} \frac{di_{\beta}}{dt} + \frac{d\Psi_{m\beta}}{dt};$$

$$\frac{d\Psi_{m\alpha}}{dt} = e_{\alpha} \frac{R_{\mu}}{L_{12}^2} - \Psi_{m\alpha} \frac{R_{\mu}}{L_{12}};$$

$$\frac{d\Psi_{m\beta}}{dt} = e_{\beta} \frac{R_{\mu}}{L_{12}^2} - \Psi_{m\beta} \frac{R_{\mu}}{L_{12}};$$

$$\begin{aligned}
 e_{\alpha} &= L_{12} \frac{di_{\alpha}}{dt} + L_{12} \cos \varphi \frac{di_{2d}}{dt} - L_{12} \sin \varphi \frac{di_{2q}}{dt}; \\
 e_{\beta} &= L_{12} \frac{di_{\beta}}{dt} + L_{12} \sin \varphi \frac{di_{2d}}{dt} + L_{12} \cos \varphi \frac{di_{2q}}{dt}; \\
 0 &= L_{2p} L_{2a} \frac{d^2 i_{2d}}{dt^2} + (L_{2p} R_{2p} + L_{2p} R_{2a} + L_{2a} R_{2p}) \times \\
 &\times \frac{di_{2d}}{dt} + R_{2p} R_{2a} i_{2d} + L_{2a} \frac{de_{2d}}{dt} + (R_{2p} + R_{2a}) e_{2d}; \\
 0 &= L_{2p} L_{2a} \frac{d^2 i_{2q}}{dt^2} + (L_{2p} R_{2p} + L_{2p} R_{2a} + L_{2a} R_{2p}) \times \\
 &\times \frac{di_{2q}}{dt} + R_{2p} R_{2a} i_{2q} + L_{2a} \frac{de_{2q}}{dt} + (R_{2p} + R_{2a}) e_{2q}; \\
 e_{2d} &= L_{12} \cos \varphi \frac{di_{\alpha}}{dt} + L_{12} \sin \varphi \frac{di_{\beta}}{dt} + L_{12} \frac{di_{2d}}{dt}; \\
 e_{2q} &= -L_{12} \sin \varphi \frac{di_{\alpha}}{dt} + L_{12} \cos \varphi \frac{di_{\beta}}{dt} + L_{12} \frac{di_{2q}}{dt}; \\
 L_{1\mu} &= L_1 - L_{12}; \\
 L_{2\mu} &= L_2 - L_{12}; \\
 M &= \frac{3}{2} p L_{12} [(i_{\beta} i_{2d} - i_{\alpha} i_{2q}) \cos \varphi - \\
 &- (i_{\alpha} i_{2d} + i_{\beta} i_{2q}) \sin \varphi]; \\
 M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt}; \\
 \frac{d\varphi}{dt} &= \omega, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где u_{α} , u_{β} – напряжения, прикладываемые к фазам α и β двухфазной модели, В; i_{α} , i_{β} – токи обмотки статора, А; i_{2d} , i_{2q} – токи обмотки ротора, А;

R_1 – сопротивление обмотки статора, Ом; L_1 , L_2 – индуктивности обмоток статора и ротора, Гн; $L_{1\mu}$, $L_{2\mu}$ – индуктивности намагничивания, Гн; R_{μ} – сопротивление намагничивающего контура, Ом; e_{α} , e_{β} – ЭДС, индуцируемые потокоцеплением статора по осям α и β , В; e_{2d} , e_{2q} – ЭДС, индуцируемые потокоцеплением ротора по осям α и β , В; L_{12} – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора, Гн; $\Psi_{m\alpha}$, $\Psi_{m\beta}$ – потокоцепления намагничивания, Вб; R_{2a} , R_{2p} – сопротивления ветвей обмотки ротора, Ом; L_{2a} , L_{2p} – индуктивности ветвей обмотки ротора, Гн; φ – угол между обмотками статора и ротора, эл. град; M – электромагнитный момент, Н·м; J – момент инерции, кг·м².

Описание наблюдателя состояния

Существует достаточно много разновидностей наблюдателей состояния [4–10].

Для оценки скорости вращения электродвигателя выбран адаптивный наблюдатель скорости [4]. Данный наблюдатель включает в себя:

- двухфазную модель асинхронного электродвигателя в осях α – β ;

- адаптор, осуществляющий настройку параметров модели асинхронного электродвигателя на основании текущих значений невязки величин токов статора, полученных на модели электродвигателя и токов статора исследуемого электродвигателя.

В ходе работы наблюдателя адаптор осуществляет непрерывную подстройку значения скорости вращения в модели электродвигателя до обеспечения минимального различия токов статора, рассчитанных на модели, и токов статора реального исследуемого электродвигателя. Таким образом, наблюдатель обеспечивает вычисление текущей скорости вращения исследуемого асин-

хронного электродвигателя и текущее значение отклонения величины активного сопротивления ротора от исходного значения, обусловленное нагревом обмотки ротора.

Для повышения точности работы наблюдателя в его внутреннюю модель электродвигателя был добавлен алгоритм, изменяющий значение активного сопротивления и индуктивности рассеивания роторной цепи в зависимости от текущей скорости вращения электродвигателя, для учета влияния эффекта вытеснения тока в стержневой обмотке ротора на параметры роторной цепи.

Система уравнений наблюдателя скорости и активного сопротивления статора электродвигателя имеет вид

$$\frac{d\hat{i}_{aa}}{dt} = a_1\hat{i}_a + a_2\hat{\Psi}_{2a} - a_3\hat{\Psi}_{2b} +$$

$$+ b_1u_a + g_1\tilde{i}_{aa} - g_2\tilde{i}_{bb};$$

$$\frac{d\hat{i}_{bb}}{dt} = a_1\hat{i}_b + a_3\hat{\Psi}_{2a} + a_2\hat{\Psi}_{2b} +$$

$$+ b_2u_b + g_2\tilde{i}_{aa} + g_1\tilde{i}_{bb};$$

$$\frac{d\hat{\Psi}_{2a}}{dt} = a_4\hat{i}_a + a_5\hat{\Psi}_{2a} - a_6\hat{\Psi}_{2b} +$$

$$+ g_3\tilde{i}_{aa} - g_4\tilde{i}_{bb};$$

$$\frac{d\hat{\Psi}_{2b}}{dt} = a_4\hat{i}_b + a_6\hat{\Psi}_{2a} + a_5\hat{\Psi}_{2b} +$$

$$+ g_4\tilde{i}_{aa} + g_3\tilde{i}_{bb};$$

$$\hat{\omega} = k_p(\hat{\Psi}_{2b}\tilde{i}_{aa} - \hat{\Psi}_{2a}\tilde{i}_{bb}) +$$

$$+ k_i \frac{d(\hat{\Psi}_{2b}\tilde{i}_{aa} - \hat{\Psi}_{2a}\tilde{i}_{bb})}{di};$$

$$\tilde{i}_{aa} = i_a - \hat{i}_a; \quad \tilde{i}_{bb} = i_b - \hat{i}_b;$$

$$b_1 = b_2 = \frac{1}{\sigma}; \quad a_1 = -\left(\frac{\hat{R}_1}{\sigma} + \alpha \cdot \beta \cdot L_m\right);$$

$$a_2 = \alpha \cdot \beta; \quad a_3 = -p_n \cdot \beta \cdot \hat{\omega};$$

$$a_4 = \alpha \cdot L_m; \quad a_5 = \alpha; \quad a_6 = p_n \cdot \hat{\omega};$$

$$g_1 = a_1(k-1); \quad g_2 = a_6(k-1);$$

$$g_3 = a_1(k-1) - \left(-\left(\frac{\hat{R}_1}{\sigma} + \alpha\right)(k-1)\frac{1}{\beta}\right);$$

$$g_4 = -\frac{a_6}{\beta}(k-1);$$

$$\Delta\hat{R}_1 = k_p(i_a\hat{i}_{aa} + i_b\hat{i}_{bb}) + k_i \frac{(i_a\hat{i}_{aa} + i_b\hat{i}_{bb})}{di}, \quad (2)$$

где \tilde{i}_a, \tilde{i}_b – ошибки оценивания компонентов вектора тока статора, А; u_a, u_b – компоненты вектора напряжения статора, В; $\hat{i}_{aa}, \hat{i}_{bb}$ – оцененные значения компонентов вектора невязок тока статора, А; $\hat{\Psi}_{2a}, \hat{\Psi}_{2b}$ – оцененные значения потокосцеплений ротора; $a_1 \dots a_6$ – коэффициенты матрицы объекта; $g_1 \dots g_4$ – коэффициенты матрицы коррекции; α, β, σ – коэффициенты, зависящие от параметров двигателя; $\hat{\omega}$ – угловая частота вращения ротора, рад/с; p_n – число пар полюсов; k_p, k_i – коэффициенты закона адаптации; k – настроечный коэффициент; $\Delta\hat{R}_1$ – оценочное значение изменения сопротивления статора в единицу времени, Ом.

При этом предлагается приведенное активное сопротивление ротора R_2'

определять при $s \geq s_{ном}$ по выражению [11]

$$R_2' = R_{2,0}' + \Delta R_2 (s - s_{ном}), \quad (3)$$

где

$$\Delta R_2 = \frac{R_{2n}' - R_{2,0}'}{1 - s_{ном}}; \quad (4)$$

$R_{2,0}'$ – приведенное активное сопротивление ротора для скольжений ($-s_{ном} \leq s \leq s_{ном}$); R_{2n}' – приведенное активное сопротивление ротора для пускового режима ($s = 1$); $s, s_{ном}$ – текущее и номинальное скольжения АД.

Моделирование и итоги

В ходе моделирования работы наблюдателя скорости исследована работа наблюдателя скорости с коррекцией значений приведенного сопротивления ротора и индуктивности рассеивания цепи ротора по линейному закону в функции скольжения. При линейной зависимости сопротивление и индуктивность рассеивания линейно изменяются от значений пускового режима (при неподвижном роторе) до номинальных значений.

На рис. 1 показан график работы наблюдателя скорости без предлагаемой коррекции, полученный методом компьютерного моделирования с использованием модели электродвигателя с учетом эффекта вытеснения тока в стержнях ротора. График 1 показывает реальную зависимость скорости вращения ротора от времени. График 2 показывает результат работы нескорректированного наблюдателя скорости.

На рис. 2 показан график работы наблюдателя скорости с коррекцией значений приведенного сопротивления ротора и индуктивности рассеивания цепи ротора по линейному закону в

функции скольжения. График 1 показывает реальную зависимость скорости вращения ротора от времени. График 2 показывает результат работы скорректированного наблюдателя скорости.

Из рис. 1 видно, что нескорректированный наблюдатель скорости дает значительную ошибку определения скорости при значениях скольжения выше критического. На рисунке наблюдаются значительные пульсации вычисленного наблюдателем значения скорости. Применение коррекции параметров роторной цепи по линейному закону существенно снижает величину ошибки определения скорости и величину пульсаций вычисленного значения скорости, однако ошибка все равно остается значительной. Таким образом, для существенного повышения точности работы наблюдателя скорости необходим переход к использованию нелинейных зависимостей параметров роторной цепи от скорости, что может являться предметом дальнейших исследований.

Выводы

В результате проведенных исследований предложен улучшенный наблюдатель скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя. Компьютерное моделирование показало, что предлагаемые изменения в алгоритме наблюдателя позволяют значительно повысить точность косвенного определения значения скорости при работе с реальным электродвигателем, у которого проявляется эффект вытеснения тока в стержнях ротора. Исследования показали, что наилучшего результата можно добиться путем расчета или предварительной идентификации зависимостей сопротивления и индуктивности рассеивания роторной цепи от скорости вращения и введения этих зависимостей во внутреннюю модель наблюдателя.

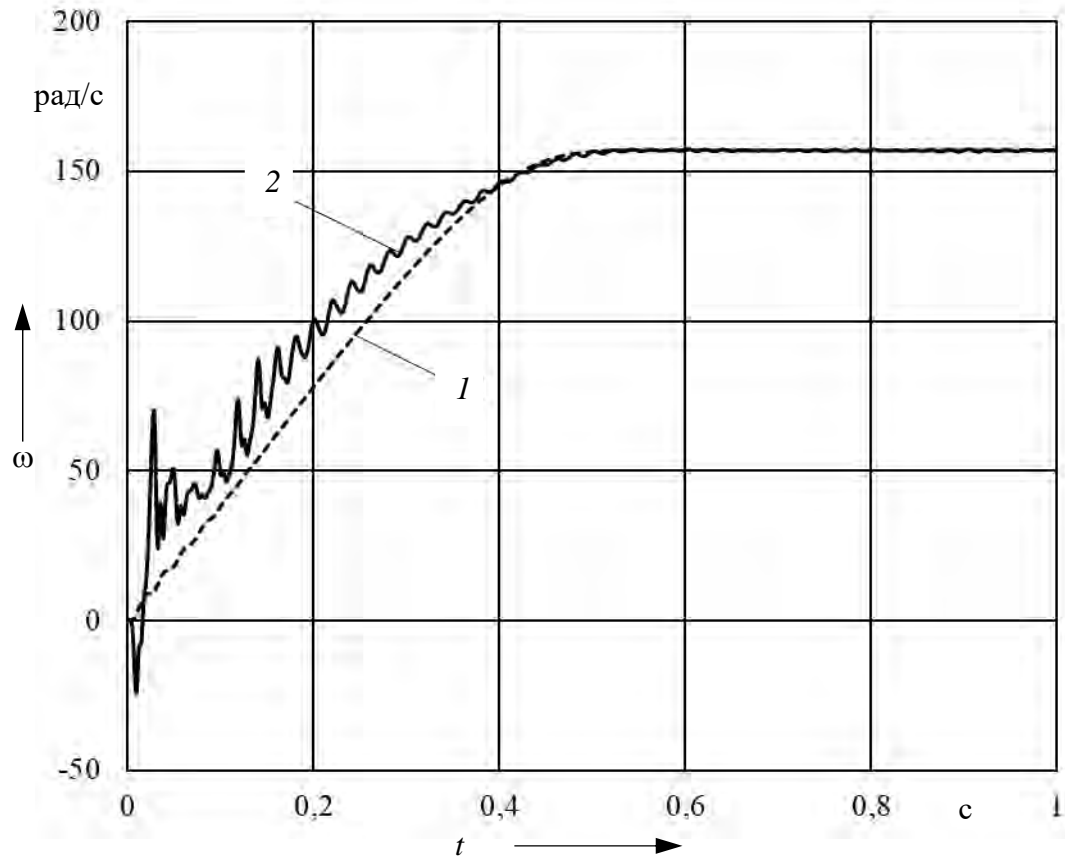


Рис. 1. Результаты моделирования нескорректированного наблюдателя скорости

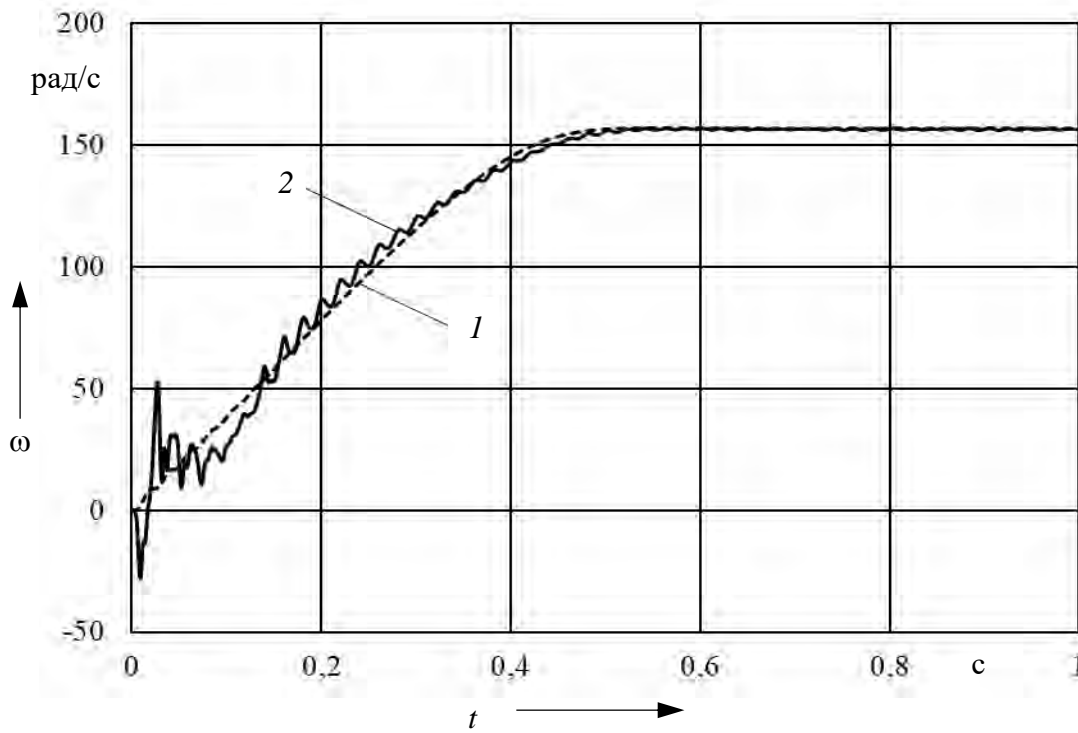


Рис. 2. Результаты моделирования скорректированного наблюдателя скорости

Исследования работы наблюдателя скорости, реализованного по принципу наблюдателя состояния, показали, что при работе с реальным электродвигателем, у которого проявляется эффект вытеснения тока в стержнях ротора, возможны погрешности определения и пульсации получаемого значения ско-

рости. Дальнейшее повышение точности работы наблюдателя скорости возможно при переходе к внесению в наблюдатель нелинейных зависимостей приведенного сопротивления ротора и индуктивности рассеивания цепи ротора от скольжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Третьяков, А. С.** Разработка уточненной электромагнитной модели асинхронного электродвигателя / А. С. Третьяков, О. А. Капитонов, Г. С. Леневский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 69–77.
2. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода: учебное пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2004. – 527 с.
3. **Hudobin, K. V.** Ukraine Adding effect of current displacement and magnetic circuit saturation in an asynchronous motor mathematical model / K. V. Hudobin // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2014. – № 2. – P. 56–59.
4. **Kubota, H.** Speed sensorless field-oriented control of induction motor with rotor resistance adaptation / H. Kubota // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1994. – Vol. 30, № 5. – P. 1219–1224.
5. **Hinkkanen, M.** Analysis and Design of Full-Order Flux Observers for Sensorless Induction Motors / M. Hinkkanen // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 2004. – Vol. 51, № 5. – P. 1033–1040.
6. **Hinkkanen, M.** 2004 Stabilization of Regenerating-Mode Operation in Sensor-less Induction Motor Drives by Full-Order Flux Observer Design / M. Hinkkanen // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 2004. – Vol. 51, № 4. – P. 1318–1328.
7. **Peresada, S.** Adaptive observers for self-commissioning of induction motor drives: Theory and experiment / S. Peresada // IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – 2014. – P. 240–245.
8. **Vladimir, V. P.** New off-line identification method of induction motor parameters / V. P. Vladimir // Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2002: Workshop Proceedings. – 2002. – Vol. 2. – P. 85–87.
9. **Castaldi, P.** Parameter estimation of induction motor at standstill with magnetic flux monitoring / P. Castaldi // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2005. – Vol. 13, № 3. – P. 386–400.
10. **Lee, R.** Reference Frames for the Simulation of Induction Motors / R. Lee // Department of electrical Engineering University of Natal, King George V Avenue, Durban 4001 (South Africa). – 1984.
11. **Фираго, Б. И.** Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.

Статья сдана в редакцию 22 августа 2023 года

Контакты:
kapitonov1987@gmail.com (Капитонов Олег Александрович);
loggie121@gmail.com (Третьяков Артем Сергеевич);
emos@rambler.ru (Леневский Геннадий Сергеевич).

O. A. KAPITONOV, A. S. TRETIAKOV, G. S. LENEVSKY

A REFINED METHOD FOR CONSTRUCTING AN OBSERVER FOR ROTATIONAL SPEED OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR ROTOR

Abstract

The analysis of the existing options for implementing an observer for rotor rotation speed in an asynchronous electric motor has been carried out. It is shown that it is necessary to develop a mathematical model of an asynchronous electric motor taking into account the effects of current displacement in the bar winding of the rotor and losses in the stator magnetic circuit. Such a model can be used for a refined simulation of the operation of a substitution scheme parameter identifier and a velocity observer. In order to achieve high accuracy of the observer operation, the correction of parameters of rotary circuit according to a nonlinear law must be introduced.

Keywords:

asynchronous motor, substitution scheme, parameter identification, preliminary identification, current identification, method of difference equations.

For citation:

Kapitonov, O. A. A refined method for constructing an observer for rotational speed of an asynchronous motor rotor / O. A. Kapitonov, A. S. Tretiakov, G. S. Lenevsky // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 76–83.