УДК 621.34

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ ПОЛНОГО ПОРЯДКА

С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, Д. Л. Приступа
Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: d.l.prystupa@gmail.com

Синтезирован новый алгоритм идентификации электрических параметров асинхронного двигателя, позволяющий определить параметры его схемы замещения как при неподвижном роторе, так и при полнофазном управлении со свободным вращением ротора. Алгоритм основан на адаптивном наблюдателе потокосцепления полного порядка, который при обеспечении условий персистности возбуждения гарантирует асимптотичность оценивания идентифицируемых переменных. Представленные результаты математического моделирования свидетельствуют о его высокой скорости сходимости и перспективности для использования в процедурах самонастройки систем векторного управления асинхронными двигателями.

Ключевые слова: идентификация, асинхронный двигатель, адаптивный наблюдатель.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ АДАПТИВНОГО СПОСТЕРІГАЧА ПОВНОГО ПОРЯДКУ

С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, Д. Л. Приступа
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: d.l.prystupa@gmail.com

Синтезовано новий алгоритм ідентифікації електричних параметрів асинхронного двигуна, який дозволяє визначати параметри його схеми заміщення як при нерухомому роторі, так і при повнофазному керуванні з вільним обертанням ротора. Алгоритм базується на адаптивному спостерігачеві потокозчеплення повного порядку, який, при забезпеченні умов персистності збудження, гарантує асимптотичність оцінювання змінних, що ідентифікуються. Представлені результати математичного моделювання свідчать про його високу швидкість сходимості та перспективність для використання в процедурах самоналаштування систем векторного керування асинхронними двигунами.

Ключові слова: ідентифікація, асинхронний двигун, адаптивний спостерігач.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современные методы векторного управления в электромеханических системах с асинхронными двигателями (АД), гарантирующие высококачественное регулирование выходных координат АД, предполагают наличие информации о значениях параметров электрической машины. Несмотря на то, что большинство серийных электроприводов ведущих производителей имеют стандартную функцию идентификации параметров АД, которая активируется при инициализации системы, общепризнанного, теоретически обоснованного решения проблемы определения параметров АД до настоящего времени не найдено.

Большинство технических решений этой проблемы основывается на упрощенных подходах без строгого их теоретического обоснования. К ним относится и результат, представленный в [1]. В этой работе дан анализ основных методов, используемых для определения параметров АД.

Лишь незначительное количество алгоритмов идентификации имеет аналитически обоснованное решение задачи. В [2] авторы применяют метод наименьших квадратов для идентификации электрических параметров АД. В алгоритме идентификации используются первые производные от токов и напряжений статора, получение которых на практике затруднительно. В [3] предложен алгоритм, основанный на использовании прямого адаптивного управления током АД при его однофазном возбуждении. Однако данный алгоритм не может быть применен для проведения тестов при вращающемся роторе с управлением всеми фазами статора АД. В работе [4] синтезирован алгоритм идентификации электрических параметров (при известном активном сопротивлении статора), который может быть использован как при однофазном возбуждении, так и при полнофазном управлении АД со свободным вращением ротора. Наблюдатель девятого порядка гарантирует глобальную экспоненциальную идентификацию трех параметров электрической части АД, которая достигнута за счет избыточной параметризации. Дополнительное оценивание ошибки наблюдения потокосцепления не только усложняет наблюдатель и его настройку, но и негативно сказывается на динамических показателях процесса идентификации.

Целью данной работы является разработка нового алгоритма определения электрических параметров АД на базе адаптивного наблюдателя полного порядка, в котором исключена избыточная параметризация.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Стандартная двухфазная динамическая модель электрической части симметричного АД, записанная в стационарной системе координат статора (a–b), имеет вид

$$\begin{aligned}
\dot{\psi}_a &= -R_1 i_a + u_a;\\
\dot{\psi}_b &= -R_1 i_b + u_b;\\
\dot{i}_a &= -\left(R_1 d + \gamma_0\right) i_a - \omega p_n i_b + b\psi_a + d\omega p_n \psi_b + d u_a;\\
\dot{i}_b &= -\left(R_1 d + \gamma_0\right) i_b + \omega p_n i_a + b\psi_b - d\omega p_n \psi_a + d u_b,
\end{aligned} \qquad (1)$$

где $(i_a, i_b), (u_a, u_b), (\psi_a, \psi_b)$ – компоненты векторов тока, напряжения и потокосцепления статора, ω – угловая скорость ротора, p_n – число пар полюсов.

В модели (1) использовано следующее определение положительных констант:

$$\begin{gathered}\sigma = L_1 - L_m^2/L_2,\ \alpha = R_2/L_2,\ \beta = L_m/\sigma L_2;\\ d=\sigma^{-1},\ b = d\alpha,\ \gamma_0 = \alpha L_m \beta + \alpha,\end{gathered} \tag{2}$$

где R_1, R_2 – активные сопротивления статора и ротора, L_1, L_2, L_m – индуктивности статора, ротора и взаимная индуктивность.

В соответствии с (1) электрическая часть АД описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений четвертого порядка, в которой измеряемыми являются токи статора и угловая скорость ротора (i_a, i_b, ω), а компоненты вектора потокосцепления статора (ψ_a, ψ_b) неизмеряемы. В общем случае, в модели (1) неизвестными являются пять электрических параметров: R_1, R_2, L_1, L_2, L_m, определение которых является сложной, до настоящего времени не решенной теоретической проблемой. Существенного упрощения задачи идентификации можно достичь, если использовать общепринятые допущения: индуктивности рассеивания статора и ротора равны, т.е. $L_1 = L_2$; неизвестные параметры АД в процессе идентификации могут рассматриваться как постоянные величины; сопротивление статора определяется на первой стадии теста идентификации по закону Ома при питании обмотки статора постоянным током.

Таким образом, если $L_1 = L_2$, а R_1 рассчитано, то идентифицировать необходимо только три параметра, которые фигурируют в (2). Из них непосредственно рассчитываются: $L_1 = L_2$, L_m, R_2.

Пусть $\hat{i}_a, \hat{i}_b, \hat{\psi}_a, \hat{\psi}_b$ – оцененные значения тока и потокосцепления статора. Определим ошибки оценивания тока и потокосцепления статора, а также ошибки оценивания неизвестных параметров следующим образом:

$$\tilde{i}_a = i_a - \hat{i}_a, \tilde{i}_b = i_b - \hat{i}_b, \tilde{\psi}_a = \psi_a - \hat{\psi}_a, \tilde{\psi}_b = \psi_b - \hat{\psi}_b; \tag{3}$$

$$\tilde{b} = b - \hat{b}, \tilde{d} = d - \hat{d}, \tilde{\gamma}_0 = \gamma_0 - \hat{\gamma}_0, \tag{4}$$

где $\hat{b}, \hat{d}, \hat{\gamma}_0$ – оценки параметров b, d, γ_0 соответственно.

Допустим, что ограниченные управляющие напряжения u_a, u_b сформированы таким образом, что вектор переменных состояния (1) является ограниченным. В этих условиях требуется найти адаптивный алгоритм оценивания тока и потокосцепления статора, который гарантирует достижение следующих целей управления:

– О.1. Асимптотическое оценивание, т.е.

$$\lim_{t\to\infty} (\tilde{i}_a, \tilde{i}_b) = 0; \tag{5}$$

$$\lim_{t\to\infty} (\tilde{\psi}_a, \tilde{\psi}_b) = 0; \tag{6}$$

– О.2. Асимптотическую идентификацию неизвестных параметров b, d, γ_0:

$$\lim_{t\to\infty} (\tilde{b}, \tilde{d}, \tilde{\gamma}_0) = 0. \tag{7}$$

Синтез алгоритма идентификации. Используя общую теорию неадаптивных наблюдателей потокосцепления для электрической подсистемы АД, которая дана в [5], сформируем адаптивный наблюдатель полного порядка в таком виде

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{\psi}}_a &= -R_1 i_a + u_a + \hat{b}\tilde{i}_a - \nu_a;\\
\dot{\hat{\psi}}_b &= -R_1 i_b + u_b + \hat{b}\tilde{i}_b - \nu_b;\\
\dot{\hat{i}}_a &= -\left(R_1\hat{d} + \hat{\gamma}_0\right)\hat{i}_a - \omega p_n \hat{i}_b +\\
&+ \hat{b}\hat{\psi}_a + \hat{d}\omega p_n \hat{\psi}_b + \hat{d}u_a + k_i \tilde{i}_a;\\
\dot{\hat{i}}_b &= -\left(R_1\hat{d} + \hat{\gamma}_0\right)\hat{i}_b + \omega p_n \hat{i}_a +\\
&+ \hat{b}\hat{\psi}_b - \hat{d}\omega p_n \hat{\psi}_a + \hat{d}u_b + k_i \tilde{i}_b,
\end{aligned} \tag{8}$$

где $k_i > 0$ – настроечный коэффициент, ν_a, ν_b – дополнительные корректирующие сигналы, которые сформированы следующим образом

$$\nu_a = \hat{d}\omega p_n \tilde{i}_b,\ \nu_b = -\hat{d}\omega p_n \tilde{i}_a. \tag{9}$$

Из (1) и (8), а также с учётом определений (3) и (4), запишем уравнения динамики ошибок оценивания в виде

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{\psi}}_a &= -b\tilde{i}_a + \tilde{b}\tilde{i}_a + d\omega p_n \tilde{i}_b - \tilde{d}\omega p_n \tilde{i}_b;\\
\dot{\tilde{\psi}}_b &= -b\tilde{i}_b + \tilde{b}\tilde{i}_b - d\omega p_n \tilde{i}_a + \tilde{d}\omega p_n \tilde{i}_a;\\
\dot{\tilde{i}}_a &= -(R_1 d + \gamma_0 + k_i)\tilde{i}_a - \omega p_n \tilde{i}_b + b\tilde{\psi}_a +\\
&+ d\omega p_n \tilde{\psi}_b - (R_1\tilde{d} + \tilde{\gamma}_0)\hat{i}_a + \tilde{b}\hat{\psi}_a + \tilde{d}\omega p_n \hat{\psi}_b + \tilde{d}u_a;\\
\dot{\tilde{i}}_b &= -(R_1 d + \gamma_0 + k_i)\tilde{i}_b + \omega p_n \tilde{i}_a + b\tilde{\psi}_b -\\
&- d\omega p_n \tilde{\psi}_a - (R_1\tilde{d} + \tilde{\gamma}_0)\hat{i}_b + \tilde{b}\hat{\psi}_b - \tilde{d}\omega p_n \hat{\psi}_a + \tilde{d}u_b.
\end{aligned} \tag{10}$$

Для синтеза алгоритма идентификации рассмотрим кандидатуру функции Ляпунова

$$V = \frac{1}{2}\left(\tilde{i}_a^2 + \tilde{i}_b^2 + \tilde{\psi}_a^2 + \tilde{\psi}_b^2 + \frac{1}{\gamma_1}\tilde{b}^2 + \frac{1}{\gamma_2}\tilde{d}^2 + \frac{1}{\gamma_3}\tilde{\gamma}_0^2\right). \tag{11}$$

Пренебрегая компонентами высокой степени малости $\tilde{b}\tilde{i}_a, \tilde{b}\tilde{i}_b, \tilde{d}\omega p_n \tilde{i}_a, \tilde{d}\omega p_n \tilde{i}_b \to 0$, а также определив динамику ошибок оценивания параметров в виде

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{b}} &= -\gamma_1\left(\hat{\psi}_a \tilde{i}_a + \hat{\psi}_b \tilde{i}_b\right);\\
\dot{\tilde{d}} &= -\gamma_2\left(f_a \tilde{i}_a + f_b \tilde{i}_b\right);\\
\dot{\tilde{\gamma}}_0 &= \gamma_3\left(\hat{i}_a \tilde{i}_a + \hat{i}_b \tilde{i}_b\right),
\end{aligned} \tag{12}$$

где $f_a = -R_1\hat{i}_a + \omega p_n \hat{\psi}_b + u_a, f_b = -R_1\hat{i}_b - \omega p_n \hat{\psi}_a + u_b$, производная от (11) в силу траекторий (10) равна

$$\dot{V} = -(R_1 d + \gamma_0 + k_i)\left(\tilde{i}_a + \tilde{i}_b\right) \le 0. \tag{13}$$

Анализируя выражения (11) и (13), устанавливаем, что неотрицательная функция (11) является функцией Ляпунова, а, следовательно, переменные, входящие в эту функцию, ограничены.

Запишем полные уравнения динамики ошибок оценивания и идентификации в следующей стандартной форме

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{\mathbf{i}}} &= \mathbf{A}(t)\tilde{\mathbf{i}} + \mathbf{W}(t)\tilde{\mathbf{x}};\\
\dot{\tilde{\mathbf{x}}} &= -\tilde{\mathbf{\Lambda}}\mathbf{W}^T(t)\mathbf{P}\tilde{\mathbf{i}},
\end{aligned} \tag{14}$$

где $\tilde{\mathbf{x}} = (\tilde{\psi}_a, \tilde{\psi}_b, \tilde{b}, \tilde{d}, \tilde{\gamma}_0)^T$; $\tilde{\mathbf{i}} = (\tilde{i}_a, \tilde{i}_b)^T$;

$$\mathbf{\Gamma} = \mathrm{diag}\left[1, 1, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\right] > 0, \mathbf{P} = \mathrm{diag}\left[1, 1\right];$$

$$\mathbf{A}(t) = \begin{pmatrix} -(R_1 d + \gamma_0 + k_i) & -\omega p_n \\ \omega p_n & -(R_1 d + \gamma_0 + k_i) \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{W}(t)=\begin{pmatrix} b & d\omega p_n & \hat{\psi}_a & f_a & -\hat{i}_a \\ -d\omega p_n & b & \hat{\psi}_b & f_b & -\hat{i}_b \end{pmatrix}.$$

Поскольку $\tilde{\psi}_a, \tilde{\psi}_b, \tilde{b}, \tilde{d}, \tilde{\gamma}_0, \tilde{i}_a, \tilde{i}_b$ являются ограниченными, то при ограниченных i_a, i_b, u_a, u_b, ψ_a, ψ_b, ω переменные $\hat{i}_a$, $\hat{i}_b$, $\hat{\psi}_a$, $\hat{\psi}_b$, $\hat{b}$, $\hat{d}$, $\hat{\gamma}_0$ также ограниченны, т.е. $\mathbf{W}(t)$ в (15) ограниченна, а, следовательно, ограниченны и $\dot{\tilde{i}}_a, \dot{\tilde{i}}_b$. Исходя из того, что

$$\int_0^t \dot{V} d\tau = -\frac{1}{R_1 d + \gamma_0 + k_i}\left[V(t) - V(0)\right] \le \frac{V(0)}{R_1 d + \gamma_0 + k_i},$$

то $\tilde{\mathbf{i}}(t)$ квадратично интегрируемый, дополнительно он является ограниченным с ограниченной производной, а поэтому, в соответствии с леммой Барбалат [6], заключаем, что $\lim\limits_{t\to\infty}(\tilde{i}_a, \tilde{i}_b) = 0$.

Если при выполнении процесса идентификации неизвестных параметров выполняются условия персистности возбуждения, т.е.

$$\int_t^{t+T} \mathbf{W}(\tau)^T \mathbf{W}(\tau) d\tau > 0 \qquad (15)$$

для некоторого $T > 0$ и всех $t \ge 0$, а также при ограниченности $\dot{\mathbf{W}}(t)$, положение равновесия $(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{i}}) = 0$ системы (15) является глобально экспоненциально устойчивым [6]. Следовательно, при выполнении условий персистности возбуждения система (10), (12) будет локально экспоненциально устойчивой, поэтому цели управления О.1 – О.2 достигаются локально.

Предположив, что идентифицируемые параметры не изменяются в процессе определения $(\dot{b} = 0, \dot{d} = 0, \dot{\gamma}_0 = 0)$, запишем в явной форме уравнения динамики оцениваемых параметров:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{b}} &= \dot{b} - \dot{\tilde{b}} = \gamma_1\left(\hat{\psi}_a \tilde{i}_a + \hat{\psi}_b \tilde{i}_b\right); \\ \dot{\hat{d}} &= \dot{d} - \dot{\tilde{d}} = \gamma_2\left(f_a \tilde{i}_a + f_b \tilde{i}_b\right); \qquad (16) \\ \dot{\hat{\gamma}}_0 &= \dot{\gamma}_0 - \dot{\tilde{\gamma}}_0 = -\gamma_3\left(\hat{i}_a \tilde{i}_a + \hat{i}_b \tilde{i}_b\right), \end{aligned}$$

где $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) > 0$ – настроечные коэффициенты.

Полные уравнения адаптивного наблюдателя оцениваемых переменных и параметров АД задаются уравнениями (8) и (16).

Исследование динамики наблюдателя. Исследование разработанного наблюдателя выполнено методом математического моделирования с использованием АД мощностью 0,75 кВт, параметры которого приведены в табл. 1. При исследовании начальные значения идентифицируемых параметров и оцениваемых переменных приняты нулевыми, настроечные коэффициенты адаптивного наблюдателя заданы равными $k_i = 100$, $\gamma_1 = 20000$, $\gamma_2 = 10$, $\gamma_3 = 10000$.

Таблица 1 – Параметры исследуемого двигателя

Параметр	Значение
R_1,Ом	11
R_2,Ом	5,5
$L_1 = L_2$,Гн	0,95
L_m,Гн	0,91

Графики изменения управляющих напряжений $u_a(t), u_b(t)$, а также основных переменных АД, которые гарантируют выполнение условий персистности возбуждения, показаны на рис. 1,а переходные процессы идентификации и оценивания – на рис. 2. Первые две секунды к фазе (а) двухфазной схемы замещения АД прикладывается модулированное напряжение, при этом $u_b = 0$, поэтому двигатель остается неподвижным. В момент времени $t = 2$ с возбуждается фаза (b), в результате чего ротор АД осуществляет свободное вращение.

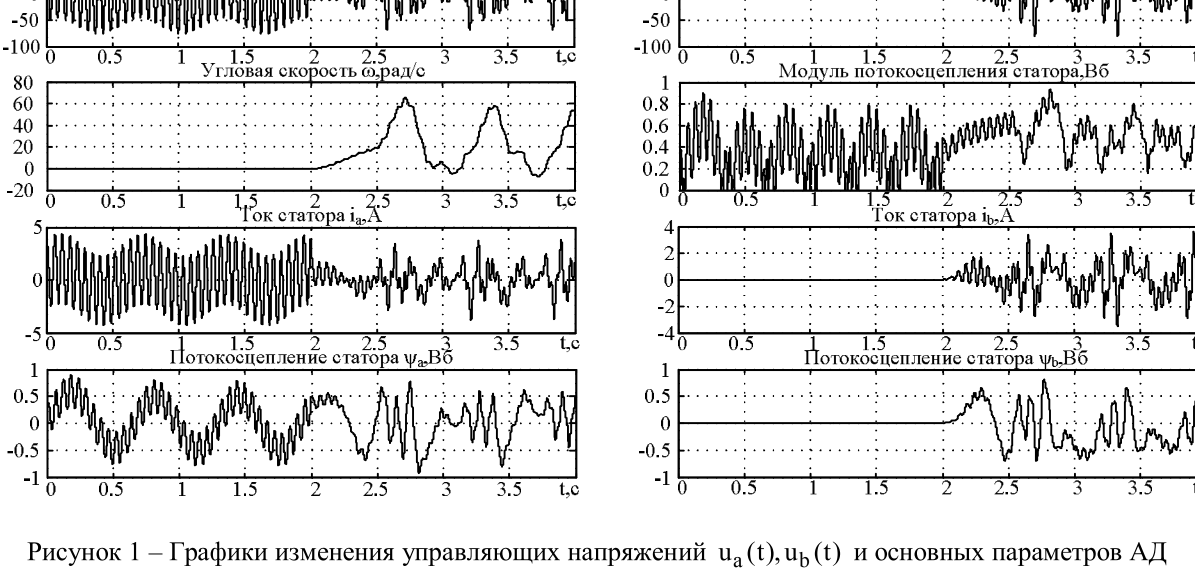

Рисунок 1 – Графики изменения управляющих напряжений $u_a(t), u_b(t)$ и основных параметров АД

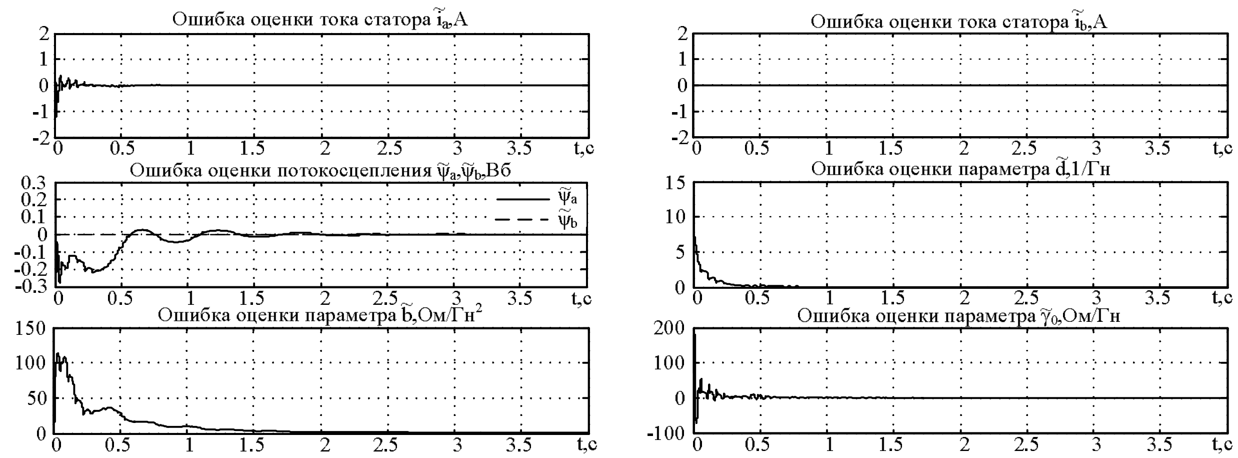

Рисунок 2 – Переходные процессы идентификации и оценивания

Из графиков переходных процессов ошибок оценивания переменных АД и ошибок идентификации неизвестных параметров следует, что все ошибки сходятся в нуль за время менее 3 с.

ВЫВОДЫ. Синтезирован новый алгоритм идентификации электрических параметров модели асинхронного двигателя при известном активном сопротивлении статора. Идентификация осуществляется с использованием адаптивного наблюдателя потокосцепления статора седьмого порядка, который при выполнении условий персистности возбуждения обеспечивает асимптотичность идентификации неизвестных параметров и оценивания неизмеряемых компонент вектора потокосцепления статора. Результаты математического моделирования свидетельствуют о высокой скорости сходимости наблюдателя и его перспективности для использования в процедурах самонастройки систем векторного управления АД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chung J., Dolen M., Kim H., Lorenz R. A Continuous-Time Observer to Estimate Electrical Parameters of Induction machine // IEEE Trans. on Industrial Applications. – 2001. – Iss. 30. – № 3. – PP. 259–265.

2. Stephan J., Bodson M. Real-Time Estimation of the Parameters of Induction Motors // IEEE Trans. on Industry applications. – 1994. – Iss. 30. – № 3. – PP. 746–759.

3. Пересада С.М., Середа А.Н. Оценка параметров асинхронного двигателя при известном активном сопротивлении статора // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Вестник НТУ “ХПИ”. – 2004. – Вып. 43. – С. 28–31.

4. Пересада С.М., Середа А.Н. Новый алгоритм идентификации электрических параметров асинхронного двигателя на основе адаптивного наблюдателя полного порядка // Техн. електродинаміка. – 2005. – № 5. – С. 32–40.

5. Verghese G.C., Sanders S.R. Observers for flux estimation in induction machines // IEEE Trans. Ind. Electron. – 1988. – Iss. 35. – PP. 85–94.

6. Narendra K.S., Annaswamy A.M. Stable Adaptive Systems // Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. – 1989.

INDUCTION MOTOR ELECTRICAL PARAMETERS IDENTIFICATION BASED ON ADAPTIVE FULL-ORDER OBSERVER

S. Peresada, S. Kovbasa, D. Prystupa
National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”
prosp. Pobedy, 37, Kiev, 03056, Ukraine. E-mail: d.l.prystupa@gmail.com

A new identification algorithm of induction motor electrical parameters under condition of single-phase excitation or in full-phase control mode is developed. The algorithm based on adaptive full-order flux observer guarantees asymptotic estimation and parameters identification under persistence of excitation conditions. The presented simulation results confirm high convergence speed and feasibility for use in self-commissioning procedures of vector control systems.

Key words: identification, induction motor, adaptive observer.

REFERENCES

1. Chung J., Dolen M., Kim H., Lorenz R. A Continuous-Time Observer to Estimate Electrical Parameters of Induction machine // *IEEE Trans. on Industrial Applications.* – 2001. – Iss. 30. – № 3. – PP. 259–265.

2. Stephan J., Bodson M. Real-Time Estimation of the Parameters of Induction Motors // *IEEE Trans. on Industry applications.* – 1994. – Iss. 30. – № 3. – PP. 746–759.

3. Peresada S.M., Sereda A.N. Induction motor parameter estimation with known active resistance of stator // *Problems of automatic electric drive. Theory and practice. Bulletin of NTU "KhPI".* – 2004. – Iss. 43. – PP. 28–31. [in Russian]

4. Peresada S.M., Sereda A.N. A new identification algorithm of induction motor electrical parameters based on adaptive full-order observer // *Tekh. elektrodynamika.* – 2005. – Iss. 5. – PP. 32–40. [in Russian]

5. Verghese G.C., Sanders S.R. Observers for flux estimation in induction machines // *IEEE Trans. Ind. Electron*. – 1988. – Iss. 35. – PP. 85–94.

6. Narendra K.S., Annaswamy A.M. Stable Adaptive Systems // *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.* – 1989.

Стаття надійшла 13.07.2012.
Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Толочко О.І.