УДК 681.511.4

Пересада С. М., докт. техн. наук, **Бовкунович В. С.**, **Ковбаса С. Н.**, канд. техн. наук (Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев)

АДАПТИВНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ МАТСУСЕ: НОВЫЙ СИНТЕЗ, ГАРАНТИРУЮЩИЙ АСИМПТОТИЧНОСТЬ ОЦЕНИВАНИЯ ВЕКТОРА ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ И АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Разработан метод синтеза адаптивного к вариациям активного сопротивления ротора наблюдателя вектора потокосцепления, имеющего структуру наблюдателя Матсусе. Впервые найдена структура обратных связей наблюдателя и определены соотношения для значений их настроечных коэффициентов, гарантирующие локальную асимптотическую устойчивость оценивания компонент вектора потокосцепления и активного сопротивления ротора в условиях, когда электромагнитный момент не равен нулю или модуль вектора потокосцепления ротора не является постоянным.

Розроблено метод синтезу адаптивного до варіацій активного опору ротора спостерігача вектора потокозчеплення, який має структуру спостерігача Матсусе. Вперше знайдено структуру зворотних зв'язків спостерігача та визначено співвідношення для коефіцієнтів налаштування, які гарантують локальну асимптотичну стійкість оцінювання компонент вектора потокозчеплення і активного опору ротора в умовах, коли електромагнітний момент не дорівнює нулю або модуль вектора потокозчеплення не є постійним.

Введение. Основным недостатком алгоритмов векторного управления асинхронным двигателем (АД) является их чувствительность к вариациям параметров электрической машины. Решению этой проблемы посвящено большое количество исследований [2,4,9] (см. [1], а также список литературы в ней), в которых показано, что основным параметрическим возмущением в рассматриваемых системах является изменение активного сопротивления ротора АД вследствие его нагрева. При этом нарушаются условия полеориентирования, из-за чего деградируют показатели качества регулирования координат, возможна даже потеря устойчивости, снижается энергетическая эффективность процесса электромеханического преобразования энергии.

Начиная с пионерской работы [3], значительные усилия были направлены на разработку теории и создание практических адаптивных систем векторного управления АД, однако до настоящего времени определенного общепризнанного решения проблемы эффективного управления АД в условиях неопределенности его параметров не существует. Это объясняется тем, что АД является нелинейным многомерным объектом управления с частично измеряемым вектором состояния, причем, изменяющиеся параметры роторной цепи входят в правую часть дифференциальных уравнений, выход которых не измеряется. Для объектов управления этого класса общая теория нелинейного управления находится только в стадии становления.

Значительная часть алгоритмов наблюдения вектора потокосцепления и идентификации активного сопротивления ротора в условиях его неопределенности не имеют строгого теоретического обоснования, с другой стороны, те, которые теоретически доказаны, как правило, очень сложны. В [5] К.Матсусе (K.Matsuse) предложил адаптивный к вариациям активного сопротивления ротора наблюдатель вектора потокосцепления, который является одним из наиболее цитируемых в публикациях данного направления. Структурно наблюдатель К. Матсусе состоит из стандартного наблюдателя Вергезе [10] полного порядка и алгоритма идентификации неизвестного сопротивления ротора, который конструируется на основе упрощенного синтеза методом Ляпунова. Наблюдатель [10] демонстрирует работоспособность, однако строгого доказательства его асимптотической устойчивости до сих пор нет. В сравнении с первыми общетеоретическими решениями [6,7], которые гарантируют глобальную асимптотическую устойчивость, наблюдатель К. Матсусе более прост (пятый порядок в сравнении с одиннадцатым [8] и девятым [9]) и содержит меньшее количество настраиваемых коэффициентов.

Отметим, что доказательство асимптотической устойчивости для нелинейной системы имеет не только теоретический интерес, но гарантирует условия, в которых система работоспособна. В тоже время технические решения могут быть работоспособны в отдельных режимах, но иметь неудовлетворительные показатели и даже быть неустойчивыми в других, определить которые наперед невозможно.

Целью настоящей статьи является исключение данного пробела в теории адаптивного управления АД путем разработки метода синтеза адаптивного наблюдателя, имеющего структуру наблюдателя Матсусе. Впервые найдена структура обратных связей наблюдателя и определены соотношения для значений их настроечных коэффициентов, гарантирующие локальную асимптотическую устойчивость.

Статья организована следующим образом. Вначале дана математическая модель АД и сформулированы цели оценивания (идентификации) и наблюдения, далее представлен метод синтеза неадаптивного наблюдателя, который затем распространен на случай синтеза адаптивного наблюдателя.

Математическая модель АД, постановка задач наблюдения и идентификации. Математическая модель электрической части симметрического АД в условиях стандартных допущений, представленная в стационарной системе координат статора (*a*–*b*), имеет вид [8]

$$\begin{aligned}
\dot{i}_{1a} &= -\left(\sigma^{-1}R_1+\alpha_N L_m\beta\right)i_{1a}+\alpha_N\beta\psi_{2a}+\beta\omega\psi_{2b}+\sigma^{-1}u_{1a}+\Delta\alpha\beta\left(\psi_{2a}-L_m i_{1a}\right),\\
\dot{i}_{1b} &= -\left(\sigma^{-1}R_1+\alpha_N L_m\beta\right)i_{1b}+\alpha_N\beta\psi_{2b}-\beta\omega\psi_{2a}+\sigma^{-1}u_{1b}+\Delta\alpha\beta\left(\psi_{2b}-L_m i_{1b}\right),\\
\dot{\psi}_{2a} &= -\alpha_N\psi_{2a}-\omega\psi_{2b}+\alpha_N L_m i_{1a}-\Delta\alpha\left(\psi_{2a}-L_m i_{1a}\right),\\
\dot{\psi}_{2b} &= -\alpha_N\psi_{2b}+\omega\psi_{2a}+\alpha_N L_m i_{1b}-\Delta\alpha\left(\psi_{2b}-L_m i_{1b}\right),
\end{aligned}\tag{1}$$

где $\left(i_{1a},i_{1b}\right)$, $\left(\psi_{2a},\psi_{2b}\right)$, $\left(u_{1a},u_{1b}\right)$ – компоненты векторов тока статора, потокосцепления ротора и напряжения статора, ω – угловая скорость, R_1, L_m – активное сопротивление статора и индуктивность намагничивающего контура. Положительные константы в (1), связанные с электрическими параметрами АД, определены следующим образом $\alpha_N=R_{2N}/L_2$, $\Delta\alpha=\Delta R_2/L_2$, $\sigma=\left(L_1-L_m^2/L_2\right)$, $\beta=L_m/L_2\sigma$, где $R_{2N},\Delta R_2$ – номинальное значение и отклонение активного сопротивления, так что $R_2=R_{2N}+\Delta R_2>0$; L_1,L_2– индуктивности статора и ротора. Без потери общности в (1) принята одна пара полюсов.

Рассмотрим следующую задачу идентификации и наблюдения. Пусть для модели (1) выполняются следующие условия: токи статора i_{1a},i_{1b} и угловая скорость ω доступны для измерения, компоненты вектора потокосцепления ротора ψ_{2a},ψ_{2b} – неизмеряемые; сигналы $\left(i_{1a},i_{1b}\right)$, $\left(\psi_{2a},\psi_{2b}\right)$, $\left(u_{1a},u_{1b}\right)$, ω являются ограниченными; сигналы i_{1a},i_{1b}, ω имеют ограниченную производную; все параметры в (1) за исключением $\Delta\alpha$ известны и постоянны, $\Delta\alpha$ – неизвестен, но постоянен.

В условиях этих допущений для системы (1) необходимо синтезировать адаптивный асимптотический наблюдатель, гарантирующий достижение следующих целей управления:

– асимптотичность оценивания переменных состояния

$$\lim_{t\to\infty}\left(\tilde{i}_{1a},\tilde{i}_{1b},\tilde{\psi}_{2a},\tilde{\psi}_{2b}\right)=0,\tag{2}$$

где $\tilde{i}_{1a}=i_{1a}-\hat{i}_{1a}$, $\tilde{i}_{1b}=i_{1b}-\hat{i}_{1b}$, $\tilde{\psi}_{2a}=\psi_{2a}-\hat{\psi}_{2a}$, $\tilde{\psi}_{2b}=\psi_{2b}-\hat{\psi}_{2b}$ – ошибки оценивания, $\hat{i}_{1a},\hat{i}_{1b},\hat{\psi}_{2a},\hat{\psi}_{2b}$ – оценки соответствующих переменных;

– асимптотичность идентификации активного сопротивления ротора, определяемого параметром $\alpha=\alpha_N+\Delta\alpha$

$$\lim_{t\to\infty}\tilde{\alpha}=0,\tag{3}$$

где $\tilde{\alpha}=\alpha-\hat{\alpha}$ – ошибка оценивания, а оценка $\hat{\alpha}$ определена как $\hat{\alpha}=\alpha_N+\Delta\hat{\alpha}>0$.

При выполнении условий (2), (3) алгоритм наблюдения и оценивания будет определять адаптивный наблюдатель полного порядка для АД, заданного моделью (1).

Замечание. Из (1) следует, что активное сопротивление ротора не является идентифицируемым, если на некотором интервале времени

$$\psi_{2a} = L_m i_{1a}, \qquad \psi_{2b} = L_m i_{1b}, \tag{4}$$

поскольку в этом случае уравнения (1) не зависят от $\Delta\alpha$. Условие (4) выполняется, если одновременно электромагнитный момент АД равен нулю и модуль вектора потокосцепления ротора постоянен. Данное свойство определяется физикой работы АД и связано с тем, что в этом режиме ток ротора равен нулю.

Синтез наблюдателя при известном активном сопротивлении ротора. Процедура синтеза неадаптивного наблюдателя потока полного порядка, известного как наблюдатель Вергезе [7], базируется на использовании второго метода Ляпунова и позволяет сконструировать семейство наблюдателей со свойством глобальной экспоненциальной устойчивости. Однако при построении адаптивных по отношению к вариациям активного сопротивления ротора наблюдателей ее использование затруднительно, поскольку неизвестный параметр $\Delta\alpha$ входит в последние два уравнения (1), которые описывают динамическое поведение неизмеряемых переменных. Один из возможных путей преодоления этого положения впервые предложен в [6,7] и состоит в преобразовании (1) к структуре, в которой динамическое поведение неизмеряемых переменных от неизвестного параметра не зависит.

Пусть $\Delta\alpha = 0$, тогда общая форма неадаптивного наблюдателя запишется в виде

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{i}}_{1a} &= -\left(R_1/\sigma + \alpha L_m\beta\right) i_{1a} + \alpha\beta\hat{\psi}_{2a} + \beta\omega\hat{\psi}_{2b} + \sigma^{-1}u_{1a} + k_1\tilde{i}_{1a},\\
\dot{\hat{i}}_{1b} &= -\left(R_1/\sigma + \alpha L_m\beta\right) i_{1b} + \alpha\beta\hat{\psi}_{2b} - \beta\omega\hat{\psi}_{2a} + \sigma^{-1}u_{1b} + k_1\tilde{i}_{1b},\\
\dot{\hat{\psi}}_{2a} &= -\alpha\hat{\psi}_{2a} - \omega\hat{\psi}_{2b} + \alpha L_m i_{1a} - \upsilon_a/\beta,\\
\dot{\hat{\psi}}_{2b} &= -\alpha\hat{\psi}_{2b} + \omega\hat{\psi}_{2a} + \alpha L_m i_{1b} - \upsilon_b/\beta,
\end{aligned} \tag{5}$$

где k_1 – коэффициент обратной связи, а корректирующие сигналы υ_a, υ_b будут определены далее.

Из (1), (5) уравнения динамики ошибок оценивания будут

$$\begin{aligned}
&\dot{\tilde{i}}_{1a} = -k_1\tilde{i}_{1a} + \alpha\beta\tilde{\psi}_{2a} + \beta\omega\tilde{\psi}_{2b}, \quad \dot{\tilde{i}}_{1b} = -k_1\tilde{i}_{1b} + \alpha\beta\tilde{\psi}_{2b} - \beta\omega\tilde{\psi}_{2a},\\
&\dot{\tilde{\psi}}_{2a} = -\alpha\tilde{\psi}_{2a} - \omega\tilde{\psi}_{2b} + \upsilon_a/\beta, \quad \dot{\tilde{\psi}}_{2b} = -\alpha\tilde{\psi}_{2b} + \omega\tilde{\psi}_{2a} + \upsilon_b/\beta.
\end{aligned} \tag{6}$$

Следуя [8], введем линейное преобразование координат

$$z_a = \tilde{i}_a + \beta\tilde{\psi}_{2a}, \;\; z_b = \tilde{i}_b + \beta\tilde{\psi}_{2b}. \tag{7}$$

В новых координатах система (6) приобретет вид

$$\begin{aligned}
\dot{z}_a &= -k_1\tilde{i}_{1a} + \upsilon_a,\\
\dot{z}_b &= -k_1\tilde{i}_{1b} + \upsilon_b,\\
\dot{\tilde{i}}_{1a} &= -\left(k_1 + \alpha\right)\tilde{i}_{1a} - \omega\tilde{i}_{1b} + \alpha z_a + \omega z_b,\\
\dot{\tilde{i}}_{1b} &= -\left(k_1 + \alpha\right)\tilde{i}_{1b} + \omega\tilde{i}_{1a} + \alpha z_b - \omega z_a.
\end{aligned} \tag{8}$$

Из структуры (8) становится понятным смысл преобразования (7): переменные z_a и z_b имеют динамику, которая не зависит от параметра α.

Для синтеза корректирующих обратных связей υ_a и υ_b рассмотрим следующую функцию Ляпунова

$$V_1 = 0.5\left(z_a^2 + z_b^2 + \tilde{i}_{1a}^2 + \tilde{i}_{1b}^2\right) > 0, \tag{9}$$

производная которой в силу решений (8) равна

$$\dot{V}_1 = -\left(k_1 + \alpha\right)\left(\tilde{i}_{1a}^2 + \tilde{i}_{1b}^2\right) \le 0, \tag{10}$$

если

$$\upsilon_a = \left(k_1 - \alpha\right)\tilde{i}_{1a} + \omega\tilde{i}_{1b}, \;\; \upsilon_b = \left(k_1 - \alpha\right)\tilde{i}_{1b} - \omega\tilde{i}_{1a}. \tag{11}$$

Из (9), (10) следует, что переменные $\tilde{i}_{1a}, \tilde{i}_{1b}, z_a, z_b$ являются ограниченными, а, следовательно $\hat{i}_{1a}, \hat{i}_{1b}, \hat{\psi}_{2a}, \hat{\psi}_{2b}, \dot{\tilde{i}}_{1a}, \dot{\tilde{i}}_{1b}$ также ограничены. Поскольку $V_1(t) \le V_1(0)/(k_1 + \alpha)$, то сигналы $\tilde{i}_{1a}, \tilde{i}_{1b}$ являются квадратично интегрируемыми, а, следовательно, из леммы Барбалат [8] получаем $\lim\limits_{t\to\infty}\left(\tilde{i}_{1a}, \tilde{i}_{1b}\right) = 0$.

Для доказательства сходимости в нуль ошибок оценивания переменных z_a, z_b запишем (8) с учетом (11) в следующей стандартной форме:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\mathbf{i}}} &= \mathbf{A}(t)\tilde{\mathbf{i}} + \mathbf{\Gamma}^T(t)\mathbf{z},\\ \dot{\mathbf{z}} &= -\mathbf{\Gamma}(t)\tilde{\mathbf{i}},\end{aligned} \tag{12}$$

где $\tilde{\mathbf{i}} = \left(\tilde{i}_{1a}, \tilde{i}_{1b}\right)^T$, $\mathbf{z} = \left(z_a, z_b\right)^T$, $\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} -\left(k_1+\alpha\right) & -\omega \\ \omega & -\left(k_1+\alpha\right)\end{bmatrix}$, $\mathbf{\Gamma}^T = \begin{bmatrix} \alpha & \omega \\ -\omega & \alpha\end{bmatrix}$, причем

$$\int\limits_t^{t+T} \mathbf{\Gamma}(\tau)\mathbf{\Gamma}^T(\tau)d\tau > 0 \,\forall\, t \geq 0, T > 0. \tag{13}$$

Используя известный результат из теории адаптивных систем [8], устанавливаем, что положение равновесия $\left(\tilde{\mathbf{i}}, \mathbf{z}\right) = 0$ является глобально экспоненциально устойчивым, а, следовательно, ошибки оценивания компонент вектора потокосцепления ротора $\tilde{\psi}_{2a}, \tilde{\psi}_{2b}$ будут экспоненциально затухать до нуля. Таким образом уравнения (5), (11) будут описывать асимптотический наблюдатель со свойством экспоненциальной устойчивости для электрической подсистемы АД.

Замечание 2. Необходимо отметить, что значения коэффициентов обратных связей наблюдателя (11) не свободны для выбора, что может быть осуществлено в стандартном наблюдателе Вергезе за счет конструирования функции Ляпунова, а являются зависимыми от значений k_1 и α.

Адаптивный наблюдатель. Используя (1), (5), (11), сконструируем адаптивный к вариациям активного сопротивления ротора наблюдатель вектора потокосцепления ротора

$$\begin{aligned}\dot{\hat{i}}_{1a} &= -\left(R_1/\sigma + \hat{\alpha}L_m\beta\right)i_{1a} + \hat{\alpha}\beta\hat{\psi}_{2a} + \beta\omega\hat{\psi}_{2b} + \sigma^{-1}u_{1a} + k_1\tilde{i}_{1a},\\ \dot{\hat{i}}_{1b} &= -\left(R_1/\sigma + \hat{\alpha}L_m\beta\right)i_{1b} + \hat{\alpha}\beta\hat{\psi}_{2b} - \beta\omega\hat{\psi}_{2a} + \sigma^{-1}u_{1b} + k_1\tilde{i}_{1b},\\ \dot{\hat{\psi}}_{2a} &= -\hat{\alpha}\hat{\psi}_{2a} - \omega\hat{\psi}_{2b} + \hat{\alpha}L_m i_{1a} - \left(k_1 - \hat{\alpha}\right)\tilde{i}_{1a} - \omega\tilde{i}_{1b},\\ \dot{\hat{\psi}}_{2b} &= -\alpha\hat{\psi}_{2b} + \omega\hat{\psi}_{2a} + \hat{\alpha}L_m i_{1b} - \left(k_1 - \hat{\alpha}\right)\tilde{i}_{1b} + \omega\tilde{i}_{1a},\\ \Delta\dot{\hat{\alpha}} &= -\dot{\hat{\alpha}} = \gamma_1\beta\left[\tilde{i}_{1a}f_a + \tilde{i}_{1b}f_b\right],\end{aligned} \tag{14}$$

где $f_a = \left(\hat{\psi}_{2a} - L_m i_{1a}\right)$, $f_b = \left(\hat{\psi}_{2b} - L_m i_{1b}\right)$; γ_1 – настроечный коэффициент алгоритма идентификации, $\gamma_1 > 0$.

Уравнения динамики ошибок оценивания и идентификации при этом будут

$$\begin{aligned}\dot{z}_a &= -\alpha\tilde{i}_{1a} + \omega\tilde{i}_{1b} + \tilde{\alpha}\tilde{i}_{1a},\\ \dot{z}_b &= -\alpha\tilde{i}_{1b} - \omega\tilde{i}_{1a} + \tilde{\alpha}\tilde{i}_{1b},\\ \dot{\tilde{i}}_{1a} &= -\left(k_1+\alpha\right)\tilde{i}_{1a} - \omega\tilde{i}_{1b} + \alpha z_a + \tilde{\alpha}\beta f_a,\\ \dot{\tilde{i}}_{1b} &= -\left(k_1+\alpha\right)\tilde{i}_{1b} + \omega\tilde{i}_{1a} + \alpha z_b + \tilde{\alpha}\beta f_b,\\ \dot{\tilde{\alpha}} &= -\gamma_1\beta\left(\tilde{i}_{1a}f_a + \tilde{i}_{1b}f_b\right).\end{aligned} \tag{15}$$

Исследуем устойчивость линеаризованной системы (15), которая получается при пренебрежении в первых двух уравнениях (15) квадратичными составляющими $\left(\tilde{\alpha}\tilde{i}_{1a}, \tilde{\alpha}\tilde{i}_{1b}\right)$. Для этого рассмотрим функцию Ляпунова $V_2 = V_1 + \gamma_1\tilde{\alpha}^2$, производная которой равна $\dot{V}_2 = \dot{V}_1 = -\left(k_1+\alpha\right)\left(\tilde{i}_{1a}^2 + \tilde{i}_{1b}^2\right) \leq 0.$

Из анализа устойчивости, аналогичного рассмотренному для неадаптивного наблюдателя, устанавливаем, что сигналы $z_a, z_b, \tilde{i}_{1a}, \tilde{i}_{1b}, \tilde{\alpha}$ ограничены, а, следовательно, и переменные $\hat{i}_{1a}, \hat{i}_{1b}, \hat{\psi}_{2a}, \hat{\psi}_{2b}, \hat{\alpha}$ будут ограниченными. С другой стороны (15) в форме (12) может быть записана с $\mathbf{z} = \left(z_a, z_b, \tilde{\alpha}\right)^T$,

$$\mathbf{\Gamma}(t) = \begin{bmatrix} \alpha & \omega & f_a \\ -\omega & \alpha & f_b\end{bmatrix}, \tag{16}$$

причем условие персистности (постоянства) возбуждения (13) [8] выполняется при $f_a \neq 0, \quad f_b \neq 0$. В этом случае положение равновесия линеаризованной системы (15) $\mathbf{x} = \left(z_a, z_b, \tilde{i}_{1a}, \tilde{i}_{1b}, \tilde{\alpha}\right) = 0$ является глобально экспоненциально устойчивым, а, следовательно, нелинеаризованная система (15) будет локально экспоненциально устойчивой.

Таким образом, уравнения (14) определяют адаптивный наблюдатель вектора потокосцепления ротора, который при $\|\mathbf{x}(0)\| \le r > 0$ будет гарантировать асимптотичность оценивания компонент вектора потокосцепления и активного сопротивления ротора. Нетрудно показать, что при $\hat{\alpha} > 0$ условие $f_a \neq 0, \quad f_b \neq 0$ соответствует условию (4), то есть $\lim\limits_{t\to\infty} \mathbf{x}(t) = 0$ достигается, если электромагнитный момент не равен нулю и модуль вектора потокосцепления ротора не является постоянным. В противном случае процесс идентификации параметра α замораживается так, что $\tilde{\alpha}$ стремится к некоторой константе. Однако локальная асимптотичность схождения ошибок оценивания $z_a, z_b, \tilde{i}_{1a}, \tilde{i}_{1b}$ в ноль сохраняется, поскольку уравнения (15) при этом приобретают структуру неадаптивного наблюдателя с дополнительными компонентами $\tilde{\alpha}\tilde{i}_{1a}, \tilde{\alpha}\tilde{i}_{1b}$ в первых двух уравнениях.

Заключение. Разработан новый метод синтеза адаптивных к изменениям активного сопротивления ротора наблюдателей вектора потокосцепления, имеющих структуру наблюдателя Матсусе. Теоретически обоснованная структура обратных связей и значения их настроечных коэффициентов гарантируют наблюдателю локальную асимптотическую устойчивость оценивания компонент вектора потокосцепления и активного сопротивления ротора в условиях, когда электромагнитный момент не равен нулю или модуль вектора потокосцепления ротора не является постоянным.

1. *Пересада С.М.* Векторное управление в асинхронном электроприводе: аналитический обзор // Вестник ДГТУ. – 1999. – С. 1 – 23.

2. *Atkinson D.J., Acarnley P.P. and Finch J. W.* Observers for induction motor state and parameter estimation // IEEE Trans. on Industrial Applications. – 1991.– Vol. 27 – No.6. – P. 1119–1127.

3. *Garces L.J.* Parameter adaptation for the speed-controlled static AC drive with a squirred-cage induction motor // IEEE Trans. on Industrial Applications. – 1980. – Vol. IA-16. – No. 2. – P. 173–178.

4. *Krishman R. and Doran F.C.* Study of parameter sensitivity in high performance inverter-fed induction motor drive systems // IEEE Trans. on Industrial Applications. – 1987. – Vol. 23. – P. 623–635.

5. *Kubota H., Matsuse K. and Nakano T.* New adaptive flux observer of induction motor for wide speed range motor drives // in Proc. Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society. – IECON’90. – Pacific Grove, California. – 1990. – P. 921–926.

6. *Marino R., Peresada S. and Tomei P.* On-line rotor resistance estimation for induction motors // Proc. Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society – IECON’94. –Bologna, Italy. – 1994. – Vol. 3. – P. 2137–2142.

7. *Marino R., Peresada S. and Tomei P.* Adaptive observer for induction motors with unknown rotor resistance // Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control – CDC’94. – Lake Buena Vista, Florida, USA. – 1994. – Vol. 1. – P. 696–697.

8. *Narendra K.S. and Annaswamy A.M.* Stable Adaptive Systems. – New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. – 496p.

9. *Roboam X., Andrieux C., de Fornel B. and Hapiot J.* Rotor flux observation and control in squirrel-cage induction motor: reliability with respect to parameters variations // IEEE Proc. D. – 1992. – Vol. 139. – P. 363–370.

10. *Verghese G.C. and Sanders S.R.* Observers for flux estimation in induction machines // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – 1988. – Vol. 35. – P. 85–94.

Надійшла 03.11.09