

Roman Niestrój\*, Arkadiusz Lewicki\*\*, Tadeusz Białoń\*, Marian Pasko\*

\*Politechnika Śląska, Gliwice

\*\*Politechnika Gdańska, Gdańsk

## ODTWARZANIE STRUMIENI MAGNETYCZNYCH I PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA INDUKCYJNEGO PRZY UŻYCIU ESTYMATORA TYPU MRAS Z OBSERWATOREM LUENBERGERA W ROLI MODELU ADAPTACYJNEGO

### RECONSTRUCTION OF MAGNETIC FLUXES AND ROTATIONAL SPEED OF INDUCTION MOTOR USING MRAS-TYPE ESTIMATOR WITH LUENBERGER OBSERVER AS AN ADAPTIVE MODEL

**Abstract:** The paper presents the principle of operation and block diagrams of different, modified MRAS-type estimators of the induction motor rotational speed. A Luenberger observer with additional integrators is used for reconstruction of magnetic fluxes in the adaptive model of the considered estimators. In the presented estimators the measurable currents of the stator winding are applied to generation of a speed tuning signal. For stator winding current reconstruction in the adaptive model there are used the Luenberger observer output signals. Moreover, in the paper there are presented the results of simulations and laboratory investigations of the described estimators operating in a multiscalar control system. For comparison, the results of similar investigations performed for a MRAS-type estimator designed basing on the so-called current model of magnetic flux estimator are given as well.

#### 1. Wstęp

Estymatory MRAS (ang.: *Model Reference Adaptive System*), stosowane w układach sterowania silnika indukcyjnego do odtwarzania prędkości kątowej  $\omega$ , należą do klasy układów adaptacyjnych, bezpośrednich (czyli takich, w których mechanizm adaptacji wpływa bezpośrednio na parametr układu adaptacyjnego, w tym przypadku  $\omega$ ) [1]. Strukturę klasycznego estymatora MRAS przedstawiono na rysunku 1a. Zasada działania i właściwości różnych wersji tego estymatora (w których użyto różnych wielkości w roli sygnałów  $\underline{w}$  i  $\hat{w}$ ) opisano w pracach [2, 3] oraz pracach w nich cytowanych. W niniejszym artykule przedstawiono estymator MRAS z silnikiem indukcyjnym w roli modelu odniesienia i obserwatorem proporcjonalnym strumieni magnetycznych w roli modelu przestrajanego. Przedstawiono analizę stabilności tego estymatora oraz wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych i laboratoryjnych.

#### 2. Model matematyczny silnika indukcyjnego i obserwatora proporcjonalnego

Uproszczony model matematyczny silnika indukcyjnego, przedstawiony w pracy [4], można

zapisać w postaci macierzowego równania stanu i wyjścia w następujący sposób:

$$t_{odn} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\omega)\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}. \quad (1)$$

Macierze  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  o odpowiednich wymiarach mają współczynniki zależne od parametrów elektromagnetycznych silnika. Pewne współczynniki macierzy  $\mathbf{A}$  dodatkowo zależą od prędkości  $\omega$ , która zmienia się znacznie wolniej, niż wielkości elektromagnetyczne, występujące w równaniu (1) [4]. Ze względu na wolnozmiennność, prędkość  $\omega$  została potraktowana jako parametr modelu matematycznego silnika, co ma znaczenie w badaniach analitycznych estymatorów MRAS, przedstawionych w rozdziale 4. Wektory: zmiennych stanu  $\mathbf{x}$ , wymuszeń  $\mathbf{u}$  i odpowiedzi  $\mathbf{y}$  mają następujące postaci:

$$\mathbf{x} = [\psi_{s\alpha} \quad \psi_{s\beta} \quad \psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta}]^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]^T, \quad \mathbf{u} = [u_{s\alpha} \quad u_{s\beta}]^T.$$

Równanie stacjonarnego obserwatora proporcjonalnego, odtwarzającego zmienne stanu obiektu, opisanego równaniem (1), ma postać:

$$t_{odn} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}(\omega)\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{K}(\mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{y}), \quad (3)$$

gdzie:  $\hat{\mathbf{x}}$  - odtwarzany wektor  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{K}$  - macierz sprzężenia zwrotnego obserwatora, którą należy

dobrac, stosując metody analityczne lub metody optymalizacyjne, opisane w pracach [5, 6].

### 3. Estymator MRAS z silnikiem indukcyjnym w roli modelu odniesienia

Estymator MRAS, który jest obiektem badań, wykorzystuje strukturę, w której do wytworzenia sygnału przestrajania prędkości  $\varepsilon_\omega$  użyto prądu stojana  $\underline{i}_s$ . Rolę modelu odniesienia pełni w niej silnik indukcyjny. Rozwiązanie takie jest pozbawione wad, związanych z niską jakością modelu odniesienia, właściwych dla klasycznej struktury estymatora MRAS, przedstawionej na rysunku 1a. Jakość badanego estymatora MRAS zależy od jakości zastosowanego modelu przestrajanego. Model przestrajany może stanowić jeden z następujących układów:

- estymator strumienia stojana  $\underline{\psi}_s$  lub wirnika  $\underline{\psi}_r$  (napięciowy lub prądowy), z estymatorem prądu  $\underline{i}_s$  (rys. 1b, praca [7]),
- obserwator proporcjonalny strumieni  $\underline{\psi}_s, \underline{\psi}_r$  z estymatorem prądu  $\underline{i}_s$  (rys. 1c, praca [8]),
- obserwator proporcjonalny prądu  $\underline{i}_s$  i strumienia  $\underline{\psi}_r$  (praca [6]) lub obserwator proporcjonalny strumieni  $\underline{\psi}_s, \underline{\psi}_r$  z dodatkowym równaniem wyjścia, na podstawie którego obliczany jest prąd  $\underline{i}_s$  (rys. 1d).

Użycie obserwatora proporcjonalnego (lub innego obserwatora Luenbergera, na przykład proporcjonalnego z dodatkowymi integratorami [9]) w modelu przestrajonym jest korzystne ze względu na jego dużą odporność na odchyłki parametrów elektromagnetycznych silnika i zakłócenia nałożone na sygnały wejściowe. Odporność ta może być kształtowana na etapie doboru macierzy  $\mathbf{K}$  metodami optymalizacyjnymi.

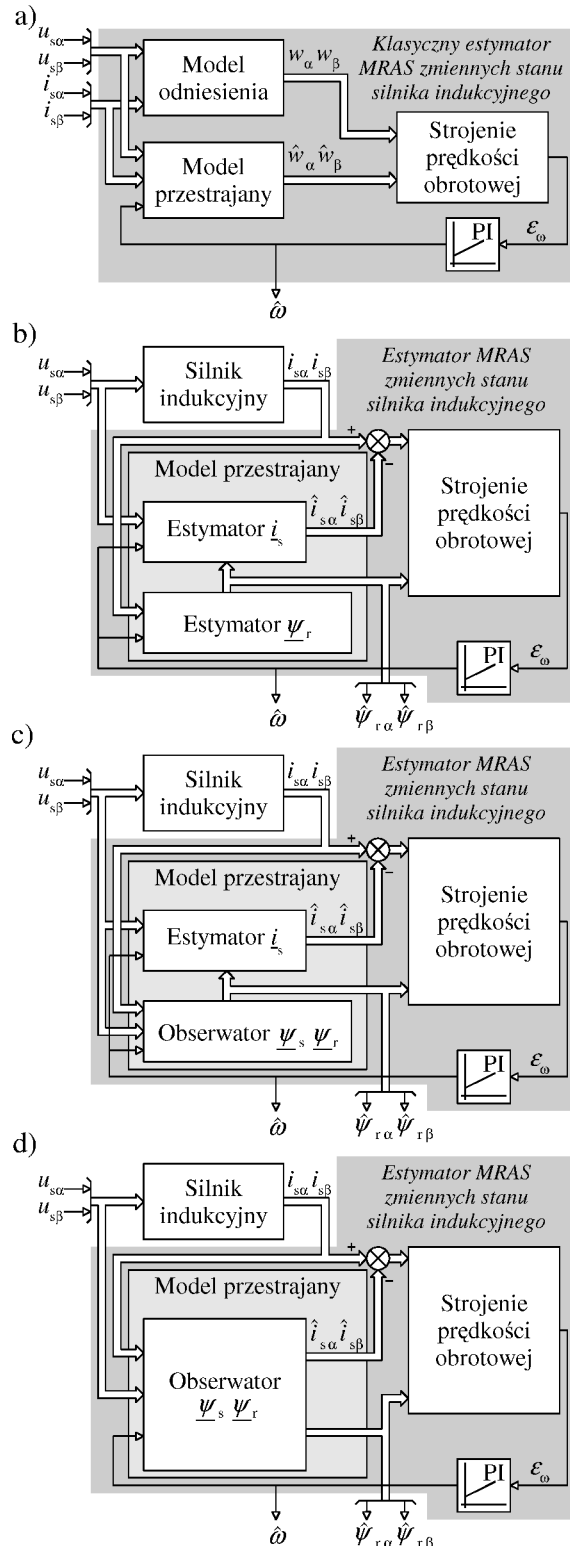
### 4. Stabilność estymatora MRAS z obserwatorem proporcjonalnym

Asymptotyczna stabilność estymatora MRAS (w sensie Lapunowa) jest jego właściwością, opisaną następującym równaniem (praca [10]):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\varepsilon\| = 0, \quad (4)$$

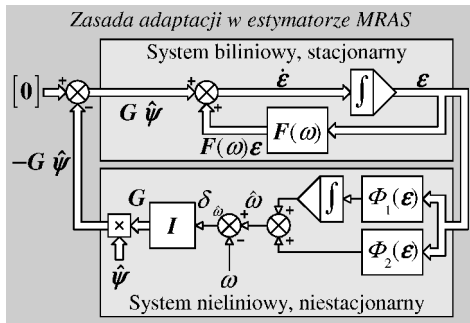
gdzie:  $\|\varepsilon\|$  – norma euklidesowa  $n$ -elementowego wektora uogólnionego błędu odtwarzania  $\varepsilon$ , wyrażona następującym równaniem:

$$\|\varepsilon\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|^2}, \quad (5)$$



Rys. 1. Schematy blokowe różnych wersji estymatorów MRAS (opis w tekście)

Badanie stabilności przeprowadzono drugą metodą Lapunowa, która polega na badaniu pochodnej funkcji Lapunowa  $V$ , przy założeniu zasady adaptacji, zastosowanej w estymatorze MRAS. Estymator MRAS można przedstawić



Rys. 2. Schemat blokowy estymatora MRAS, prezentujący zasadę adaptacji

w formie schematu blokowego jak na rysunku 2, definiując wektor  $\boldsymbol{\varepsilon}$  i obliczając jego pochodną:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}, \quad \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\mathbf{x}} - \dot{\hat{\mathbf{x}}}. \quad (6)$$

Podstawiając zależności (1), (3) do równań (6), i uwzględniając równanie wyjścia obserwatora, otrzymuje się następujące zależności:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{F}(\omega)\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{G}\dot{\hat{\mathbf{x}}}, \quad \mathbf{F}(\omega) = \mathbf{A}(\omega) - \mathbf{K}\mathbf{C}. \quad (7)$$

Macierz  $\mathbf{F}(\omega)$  jest ujemnie określona, co wynika z warunku stabilności obserwatora proporcjonalnego [11]. Macierz  $\mathbf{G}$  ma postać:

$$\mathbf{G} = \delta_{\hat{\omega}}\mathbf{I}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \delta_{\hat{\omega}} = \hat{\omega} - \omega. \quad (8)$$

Do badania stabilności wybrano funkcję Lapunowa (skalarną, dodatnio określoną, różniczkowalną [6], [10]) o następującej postaci:

$$V = \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{P}\boldsymbol{\varepsilon} + k_1(\delta_{\hat{\omega}} + k_2 v)^2, \quad k_1, k_2 > 0, \quad (9)$$

$$v = \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{P}\mathbf{I}\dot{\hat{\mathbf{x}}}, \quad (10)$$

gdzie:  $\mathbf{P}$  – dodatnio określona macierz symetryczna o wymiarze  $4 \times 4$ . Warunek stabilności jest określony w następujący sposób:

$$\dot{V} < 0, \quad \dot{V} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^T \mathbf{P}\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{P}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \dots \\ \dots + 2k_1(\delta_{\hat{\omega}} + k_2 v)(\dot{\delta}_{\hat{\omega}} + k_2 \dot{v}). \quad (11)$$

Założono następującą zasadę adaptacji:

$$\dot{\delta}_{\hat{\omega}} = -k_1^{-1} v - k_2 \dot{v}. \quad (12)$$

Uwzględniając równanie (12) w zależności (11) otrzymuje się, po przekształceniach, warunek stabilności o następującej postaci:

$$-(\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{Q}\boldsymbol{\varepsilon}) - 2k_2(\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{P}\mathbf{I}\dot{\hat{\mathbf{x}}})^2 < 0, \quad (13)$$

gdzie:  $\mathbf{Q}$  – dowolna, dodatnio określona macierz symetryczna, spełniająca równanie:

$$\mathbf{F}^T(\omega)\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{F}(\omega) = -\mathbf{Q}. \quad (14)$$

W związku z tym prawdziwe są nierówności:

$$-(\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{Q}\boldsymbol{\varepsilon}) < 0, \quad -2k_2(\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{P}\mathbf{I}\dot{\hat{\mathbf{x}}})^2 \leq 0, \quad (15)$$

co oznacza spełnienie warunku stabilności. Podstawiając równanie (10) do zasady adaptacji (12) i dodatkowo przyjmując, że  $\dot{\omega} = 0$  (wolnozmienność prędkości  $\omega$ ), otrzymuje się:

$$\dot{\hat{\omega}} = k_1^{-1} \varepsilon_{\omega} + k_2 \dot{\varepsilon}_{\omega}. \quad (16)$$

Sygnał strojenia prędkości  $\varepsilon_{\omega}$ , wyprowadza się z równania (12). Intuicyjną postać tego sygnału, zastosowaną w badanym estymatorze MRAS, która wyraża się równaniem:

$$\varepsilon_{\omega} = (i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha})\hat{\psi}_{r\beta} - (i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta})\hat{\psi}_{r\alpha}, \quad (17)$$

otrzymuje się po przyjęciu założeń, dotyczących wartości niektórych elementów macierzy  $\mathbf{P}$ , która przyjmuje następującą postać:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & c & 0 \\ P_{21} & P_{22} & 0 & c \\ c & 0 & -a & 0 \\ 0 & c & 0 & -a \end{bmatrix}, \quad a = \frac{L_m}{L_m^2 - L_s L_r}, \quad (18) \\ c = \frac{L_r}{L_m^2 - L_s L_r}.$$

Elementy  $P_{ij}$  dla  $i = 1, 2$  oraz  $j = 1, 2$  wybiera się tak, aby przy zadanej macierzy  $\mathbf{Q}$ , spełnione było równanie (14). Stosując do równania (16) przekształcenie Laplace'a otrzymuje się zależność:

$$s\hat{\omega} = \varepsilon_{\omega}(k_1^{-1} + sk_2), \quad (19)$$

gdzie:  $s$  – zmienna zespolona w przekształceniu Laplace'a. Z zależności (19) można wyznaczyć transmitancję operatorową  $K(s)$  członu adaptacyjnego, (która jest transmitancją regulatora PI), opisaną następującą zależnością:

$$K(s) = k_p + \frac{k_1}{s}, \quad k_p = k_2, \quad k_1 = \frac{1}{k_1}. \quad (20)$$

Ostatecznie zależność opisująca prawo strojenia prędkości  $\hat{\omega}$  ma postać:

$$\hat{\omega} = k_p \varepsilon_{\omega} + k_1 \int_0^t \varepsilon_{\omega} d\tau = \phi_2(\boldsymbol{\varepsilon}) + \int_0^t \phi_1(\boldsymbol{\varepsilon}) d\tau. \quad (21)$$

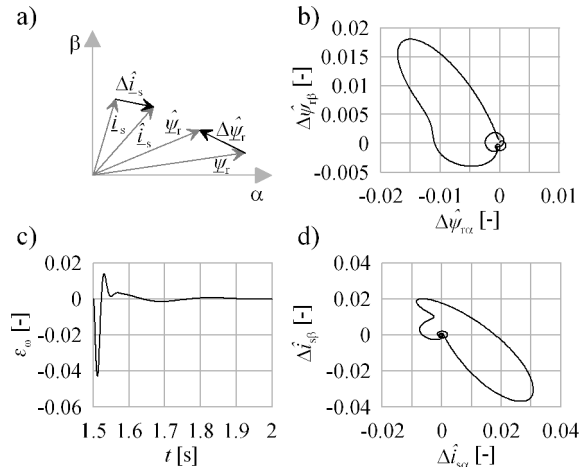
Zastosowana funkcja Lapunowa (9) i zasada adaptacji (12), pozwalają udowodnić stabilność estymatora MRAS z regulatorem PI w roli członu adaptacyjnego. Jest to rozwiązanie korzystne z punktu widzenia realizacji praktycznej, zapewniające dobre właściwości dynamiczne. Zastosowanie innych funkcji Lapuno-

wa pozwala przeprowadzić analogiczny dowód dla klasycznego integratora [12] lub elementu inercyjnego pierwszego rzędu [6] w roli członu adaptacyjnego. Wartości współczynników  $k_p$  i  $k_I$  w zależności (21) teoretycznie mogą być dowolnie duże, ale w realizacji praktycznej podlegają ograniczeniom, ze względu na wzmacnianie zakłóceń. Przekształcenia równań zostały wykonane za pomocą procesora symbolicznego programu Mathcad. Szczegóły zostały pominięte ze względu na ich obszerność.

### 5. Analiza sygnału strojenia prędkości

Sygnal  $\varepsilon_\omega$  opisany równaniem (17), generowany w układach na rysunkach 1b, 1c, 1d przez blok „Strojenie prędkości obrotowej”, jest proporcjonalny do różnicy momentu elektromagnetycznego  $\hat{m}_e$ , wyznaczonego na podstawie zmierzonego prądu  $\hat{i}_s$  oraz estymowanego strumienia  $\hat{\psi}_r$  i  $\hat{m}_e$ , wyznaczonego na podstawie estymowanych wartości prądu  $\hat{i}_s$  oraz strumienia  $\hat{\psi}_r$ :

$$\varepsilon_\omega \sim \hat{m}_e - \hat{m}_e. \quad (22)$$



Rys. 3. Powstawanie i zanikanie sygnału przestrojenia prędkości w estymatorze MRAS

Różnica tych momentów powstaje po zaburzeniu stanu równowagi w estymatorze MRAS i jest wynikiem powstania błędu  $\Delta \hat{i}_s$  odwzorowania prądu  $\hat{i}_s$ . Dodatkowo powstaje błąd  $\Delta \hat{\psi}_r$  odwzorowania strumienia  $\hat{\psi}_r$ , co przedstawiono na rysunku 3a. Powstawanie i zanikanie sygnału  $\varepsilon_\omega$  po skokowej zmianie momentu obciążenia w czasie  $t = 1,5$  s przedstawiono na rysunku 3c.

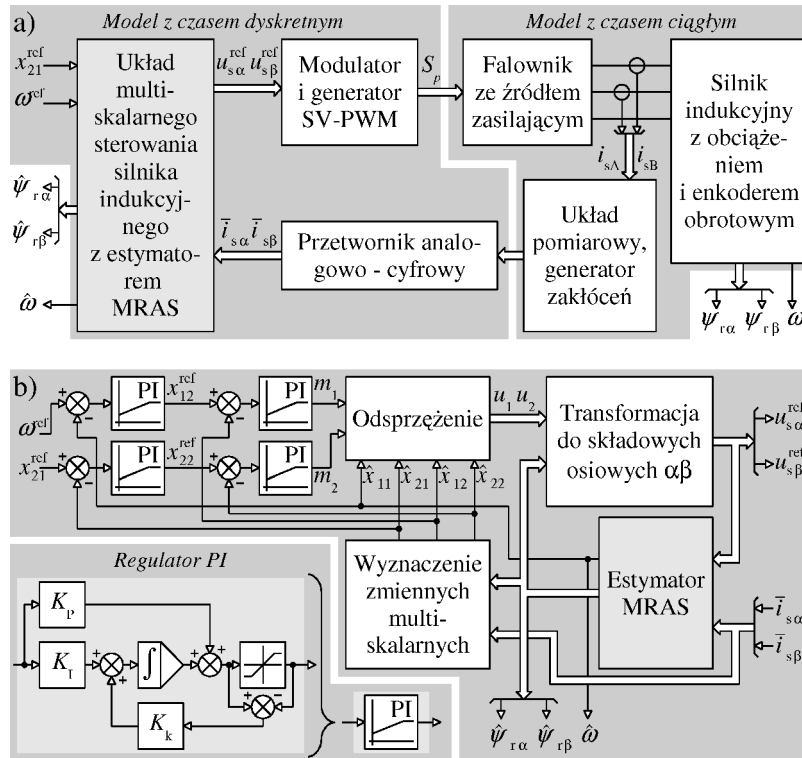
Hodografy wektorów  $\Delta \hat{i}_s$  i  $\Delta \hat{\psi}_r$  przedstawione na rysunkach 3b, 3d, które zdążając do zera, potwierdzają stabilność estymatora MRAS. Czas trwania stanu przejściowego zależy od wartości współczynników  $k_p$  i  $k_I$  w zależności (21). W powyższych rozważaniach rolę strumienia  $\hat{\psi}_r$  może pełnić strumień  $\hat{\psi}_s$ .

### 6. Badania symulacyjne i laboratoryjne

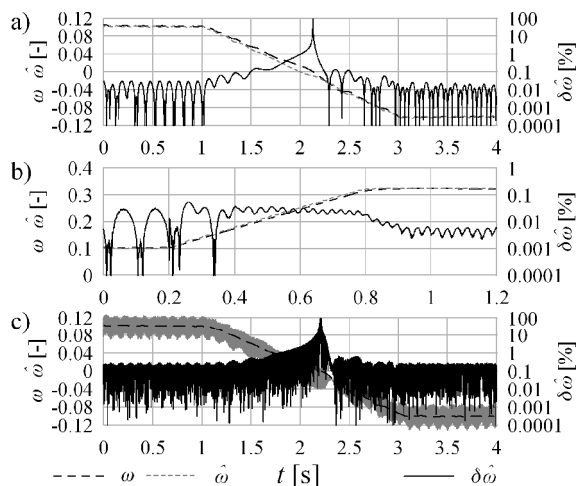
Badania symulacyjne wykonano w środowisku Matlab-Simulink dla estymatora MRAS z obserwatorem proporcjonalnym, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 1d. Badania przeprowadzono w układzie multiskalarnego sterowania silnika indukcyjnego [13]. Układ ten działa w oparciu o multiskalarne zmienne stanu, spośród których zmienna  $x_{12}$  ma wartość proporcjonalną do momentu elektromagnetycznego  $m_e$  silnika, a zmienna  $x_{21}$  ma wartość równą kwadratowi modułu strumienia  $\psi_r$ . W badaniach symulacyjnych wykorzystano model układu sterowania z dyskretyzacją czasu i wartości wielkości mierzonych przez przetwornik analogowo-cyfrowy. Ponadto zastosowano model przekształtnika energoelektronicznego, pracującego z modulacją szerokości impulsów. Schemat blokowy modelu układu sterowania przedstawiono na rysunku 4a. Ponadto na rysunku 4b przedstawiono szczegółowy schemat blokowy układu multiskalarnego sterowania silnika indukcyjnego. Badania symulacyjne wykonano przy uwzględnieniu zakłóceń w modelach czujników pomiarowych oraz przy odchyłkach rezystancji uzwojeń silnika indukcyjnego (dla  $R_s$  o +20%, dla  $R_r$  o +30%). Przy optymalnych, dobranych eksperymentalnie, wartościach współczynników  $k_p$  i  $k_I$  uzyskano wyniki przedstawione na rysunku 5a dla powolnego nawrotu przy małej prędkości  $\omega$  oraz na rysunku 5b dla szybkiego przyśpieszenia z jednoczesnym odwzбудzaniem. Na rysunku 5c przedstawiono efekt wzmacniania zakłóceń przy zbyt dużych wartościach współczynników  $k_p$  i  $k_I$ . Badania laboratoryjne wykonano również w układzie multiskalarnego sterowania silnika indukcyjnego (o mocy 5 kW) za pomocą stanowiska, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 6. Badania prowadzone były przy znacznych odchyłkach parametrów elektromagnetycznych silnika indukcyjnego oraz w obecności silnych zakłóceń. Wyniki badań laboratoryjnych, dla różnych wersji estyma-

torów MRAS, przedstawiono na rysunku 7. W szczególności na rysunku 7a przedstawiono wyniki uzyskane dla estymatora MRAS z rysunku 1b (z modelem prądowym). Ze względu

na duże odchyłki parametrów elektromagnetycznych silnika, jakość odtwarzania prędkości silnika była zbyt niska.

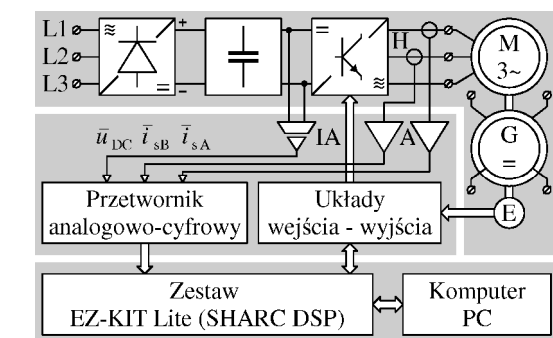


Rys. 4. Schemat blokowy układu do badań symulacyjnych: a) układ sterowania, b) szczegółowy schemat blokowy układu multiskalarnego



Rys. 5. Wyniki badań symulacyjnych (opis w tekście);  $\delta\hat{\omega}$  – błąd względny  $\hat{\omega}$

Układ sterowania nie wykonał nawrotu pomimo poprawnego przebiegu zmiennej  $x_{21}$ . Analogiczny problem wystąpił dla estymatora MRAS z obserwatorem proporcjonalnym (rys. 7b). Znacznie lepszą odporność na zakłócenia wykazał estymator MRAS z obserwatorem pro-

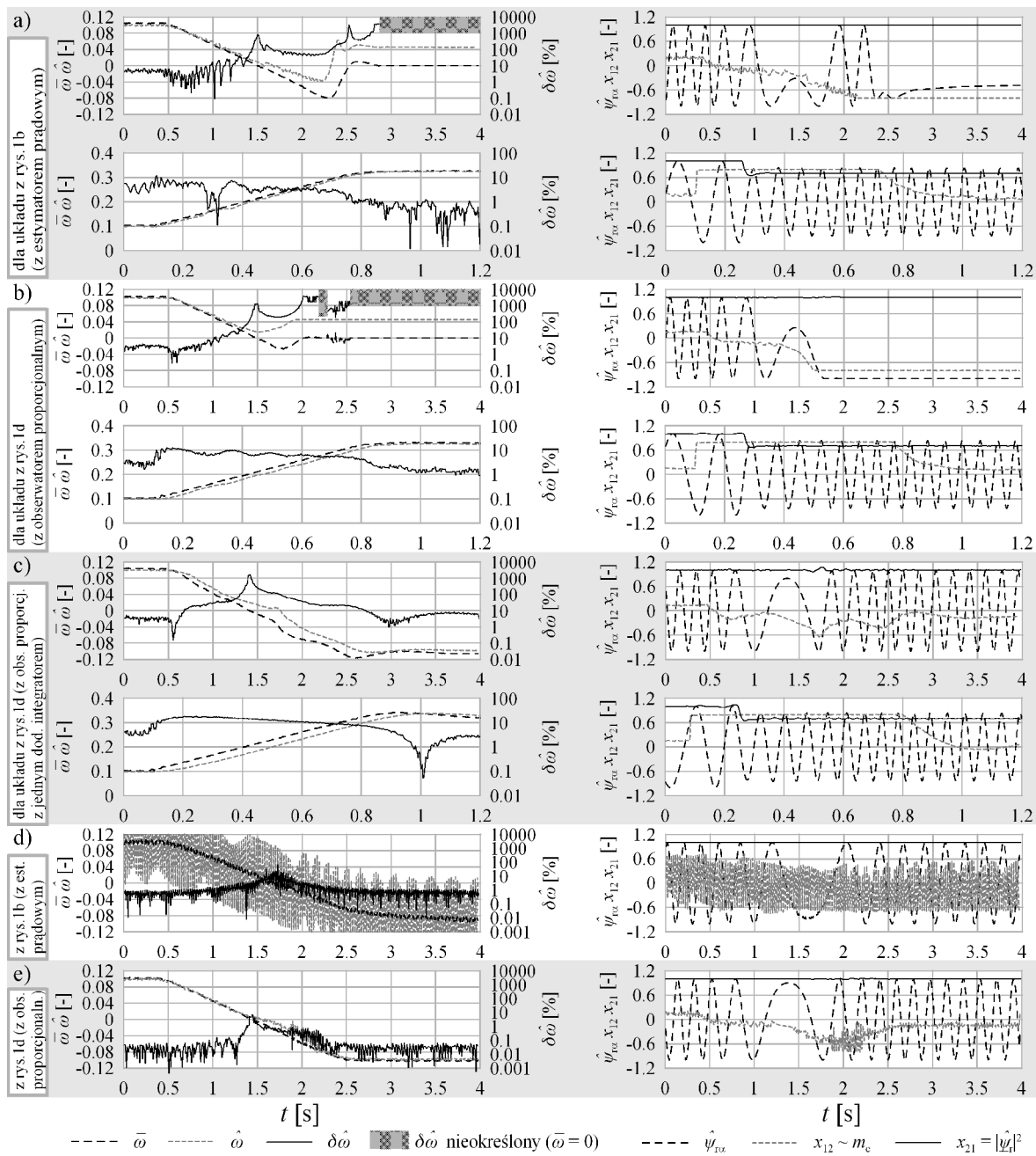


Rys. 6. Schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego (H – czujniki hallotronowe prądu, A – wzmacniacze pomiarowe, IA – wzmacniacz z izolacją galwaniczną, E – enkoder optyczny)

porcjonalnym z jednym dodatkowym integratorem, w którym istnieje dodatkowe, korekcyjne sprzężenie zwrotne, którego wartość zależy od czasu. Powoduje to silne tłumienie długotrwałych błędów odtwarzania zmiennych stanu. Dlatego po zastosowaniu tego obserwatora,

układ sterowania prawidłowo wykonał nawrót (rys. 7c). Na rysunkach 7d, 7e przedstawiono reakcję estymatorów MRAS na radykalne

zwiększenie wartości współczynników  $k_p$  i  $k_i$  - tylko wynik z rysunku 7e można uznać za poprawny.



Rys. 7. Wyniki badań laboratoryjnych (opis w tekście);  $\bar{\omega}$  – prędkość zmierzona

## 7. Wnioski

W badaniach analitycznych potwierdzono stabilność estymatorów MRAS z obserwatorem proporcjonalnym. W badaniach symulacyjnych i laboratoryjnych, wykonanych w bezczujnikowym układzie multiskalarnego sterowania silnika indukcyjnego średniej mocy, wykazano praktyczną użyteczność tych estymatorów a także estymatorów MRAS, wyposażonych w obserwator proporcjonalny z dodatkowymi integratorami.

## 8. Literatura

- [1] Ioannou P.A., Sun J.: *Robust Adaptive Control*. Prentice Hall, 1996
- [2] Vas P.: *Sensorless Vector And Direct Torque Control*. Oxford University Press, 1998
- [3] Orłowska-Kowalska T., Dybkowski M.: *Improved MRAS-type speed estimator for the sensorless induction motor drive*. EPNC 2006. XIX Symposium, Maribor, Slovenia, June 28-30, 2006

- [4] Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Helion, Gliwice 1998
- [5] Griva G., Profumo F. i inni: *General Adaptation Law for MRAS High Performance Sensorless Induction Motor Drives*. IEEE 2001
- [6] Żywiec A., Białoń T.: *Synteza obserwatora sprzężeń elektromagnetycznych silnika indukcyjnego przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych*. SME 2003 Gdańsk – Jurata, CD
- [7] Dybkowski M., Orłowska-Kowalska T.: *Analiza dynamiki prądowego estymatora MRAS strumienia i prędkości wirnika silnika indukcyjnego*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 6/2008, ss. 165-168
- [8] Niestrój R., Białoń T.: *Estymator typu MRAS z proporcjonalnym obserwatorem Luenbergera do odtwarzania zmiennych stanu silnika indukcyjnego*. SME 2008, Wrocław, ss. 372-377
- [9] Białoń T., Pasko M.: *Zastosowanie obserwatora rozszerzonego do odtwarzania elektromagnetycznych strumieni sprzężonych i prędkości obrotowej silnika indukcyjnego*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 1/2005, ss. 13-17
- [10] Amerongen Van J., Udink Ten Cate A.J.: *Model Reference Adaptive Autopilots for Ships*. Automata, Vol. 11, Pergamon Press, 1975
- [11] Orłowska-Kowalska T.: *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003
- [12] Amerongen Van J.: *MRAS: Model Reference Adaptive Systems*. Journal A, Vol. 22, no 4/1981
- [13] Krzeminski Z., Lewicki A., Włas M.: *Properties of sensorless control systems based on multiscalar models of the induction motor*. COMPEL, nr 1, 2006, ss. 195-206

### Autorzy

Dr inż. Roman Niestrój,  
e-mail: [roman.niestroj@polsl.pl](mailto:roman.niestroj@polsl.pl)  
Mgr inż. Tadeusz Białoń,  
e-mail: [tadeusz.bialon@polsl.pl](mailto:tadeusz.bialon@polsl.pl)  
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych,  
Prof. dr hab. inż. Marian Pasko,  
e-mail: [marian.pasko@polsl.pl](mailto:marian.pasko@polsl.pl)  
Instytut Elektrotechniki Przemysłowej i Informatyki,  
Politechnika Śląska,  
Wydział Elektryczny,  
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice

Dr inż. Arkadiusz Lewicki,  
e-mail: [alewicki@ely.pg.gda.pl](mailto:alewicki@ely.pg.gda.pl)  
Politechnika Gdańska,  
Wydział Elektrotechniki i Automatyki,  
Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego,  
ul. Sobieskiego 7, 80-216 Gdańsk