

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

\*Politechnika Śląska, Gliwice

\*\*Politechnika Gdańska, Gdańsk

## ZASTOSOWANIE OBSERWATORA PROPORCJONALNEGO Z DODATKOWYMI INTEGRATORAMI DO ODTWARZANIA ZMIENNYCH STANU SILNIKA INDUKCYJNEGO

### APPLICATION OF THE PROPORTIONAL OBSERVER WITH ADDITIONAL INTEGRATORS TO RECONSTRUCTION OF INDUCTION MOTOR STATE VARIABLES

**Abstract:** In the paper there are presented some problems connected with reconstruction of induction motor state variables with use of a proportional observer with additional integrators. The considered Luenberger observer with additional integrators has high resistance to disturbances overlapping its input signals. In the paper the mathematical model and error equation of the observer are given. There is also described the application of the considered observer as an adaptive model in the structure of a MRAS-type estimator for reconstruction of rotational speed and magnetic fluxes of an induction motor. The quality of the observer operation is evaluated based on the quality of operation of a multiscalar control system using the values reconstructed by the observer as feedback signals.

#### 1. Wstęp

Obserwatory Luenbergera stosowane w układach sterowania silnika indukcyjnego zapewniają dobrą jakość odtwarzania zmiennych stanu w różnych stanach pracy silnika [1]. Możliwości doboru parametrów pozwalają w szerokim zakresie kształtować właściwości dynamiczne obserwatorów, z uwzględnieniem odporności na różnego rodzaju zakłócenia [2]. Jakość odtwarzania w obserwatorze zmiennych stanu znacznie się obniża wraz ze wzrostem zawartości zakłóceń w przebiegach wejściowych obserwatora, w szczególności, w przebiegu prędkości obrotowej. Ma to szczególnie duże znaczenie, gdy obserwator wchodzi w skład większej struktury, w której podawana na wejście obserwatora prędkość obrotowa jest odtwarzana na podstawie między innymi sygnałów wyjściowych z tego obserwatora. Taką strukturą jak estymator typu MRAS [3, 4]. W takich przypadkach może dochodzić do wzmocnienia zakłóceń w zamkniętej pętli odtwarzania prędkości obrotowej. Problem ten można rozwiązać stosując w takich przypadkach obserwator z dodatkowymi integratorami [5]. Traktując zakłócenia jako niemierzalne wymuszenia, obserwator ten potrafi skompensować skutki ich występowania za pomocą odpowiednio rozbudowanego, korekcyjnego sprzężenia zwrotnego.

#### 2. Model matematyczny obserwatora proporcjonalnego z dodatkowymi integratorami

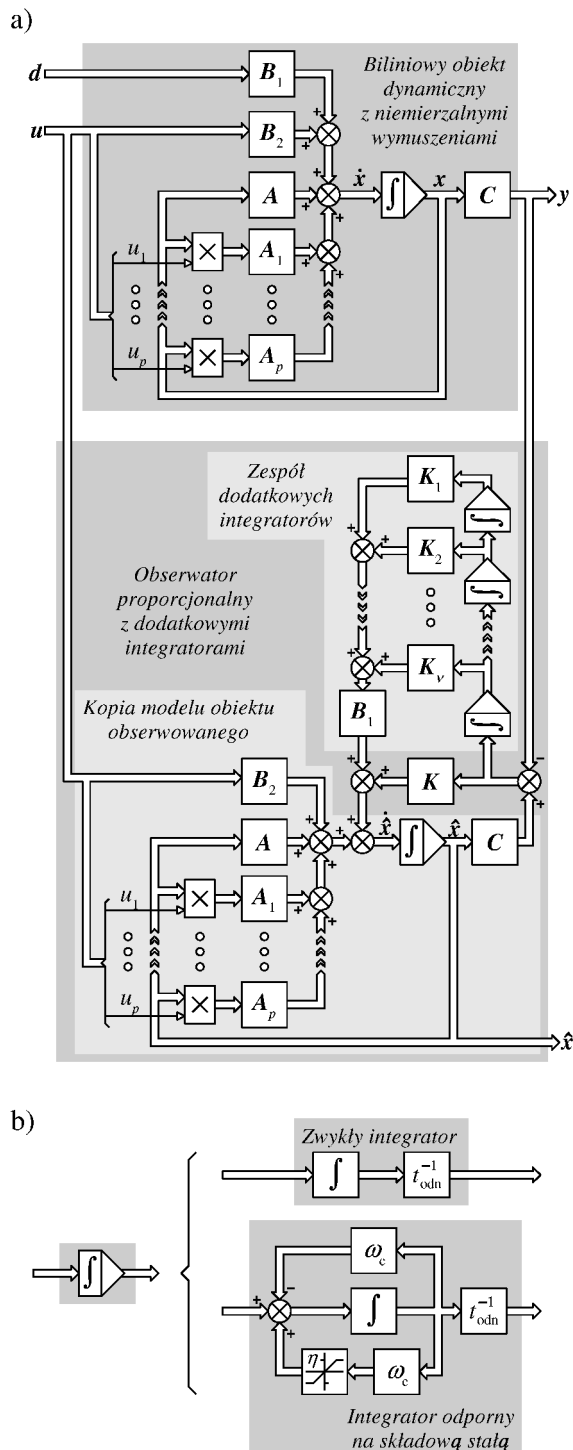
Biliniowy, stacjonarny obiekt dynamiczny o  $p$  mierzalnych wymuszeniach zawartych w wektorze  $\mathbf{u}$ , z niemierzalnych wymuszeniach zawartych w wektorze  $\mathbf{d}$ ,  $q$  wyjściach zawartych w wektorze  $\mathbf{y}$  i  $n$  zmiennych stanu zawartych w wektorze  $\mathbf{x}$ , można opisać w wielkościach względnych równaniem stanu (1) i równaniem wyjścia (2):

$$t_{\text{odn}} \dot{\mathbf{x}} = \left( \mathbf{A} + \sum_{i=1}^p u_i \mathbf{A}_i \right) \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 \mathbf{d} + \mathbf{B}_2 \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} \quad (2)$$

Macierze  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{A}_i$ ,  $\mathbf{B}_1$ ,  $\mathbf{B}_2$  i  $\mathbf{C}$  mają odpowiednie wymiary i wartości elementów stałe w czasie, jako  $t_{\text{odn}}$  oznaczono czas odniesienia, jako  $u_i$  oznaczono  $i$ -ty element wektora  $\mathbf{u}$ .

Model matematyczny obserwatora Luenbergera składa się z kopii modelu matematycznego obiektu obserwowanego i korekcyjnego sprzężenia zwrotnego. W przypadku obserwatora z dodatkowymi integratorami (rys. 1a) w kopii modelu obiektu brakuje czynnika związanego z niemierzalnymi wymuszeniami zawartymi w wektorze  $\mathbf{d}$ , występującego w równaniu (1). Brak ten jest kompensowany przez zespół  $v$  do-



Rys. 1. Schemat blokowy układu: obiekt obserwowany – obserwator (a), rozwinięcie integratora (b)

dodatkowych integratorów w sprzężeniu zwrotnym obserwatora (rys. 1a). Należy zauważyć, że sygnał wyjściowy zespołu integratorów, dzięki pomnożeniu przez macierz  $B_1$ , jest wprowadzany do kopii modelu obiektu obserwowanego dokładnie w tym miejscu, w którym powinno się pojawić niemierzalne wymuszenie.

Biliniowy, proporcjonalny obserwator z  $\nu$  dodatkowymi integratorami jest więc opisany równaniem stanu:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{odn}} \dot{\hat{x}} = & \left( A + \sum_{i=1}^p u_i A_i \right) \hat{x} + B_2 u + \\
 & + K(C\hat{x} - y) + B_1 K_\nu \frac{1}{t_{\text{odn}}} \int_0^t (C\hat{x} - y) d\tau + \\
 & + B_1 K_{\nu-1} \frac{1}{t_{\text{odn}}} \frac{1}{2} \int_0^t \int_0^t (C\hat{x} - y) d\tau^2 + \dots \\
 & \dots + B_1 K_1 \frac{1}{t_{\text{odn}}} \underbrace{\int_0^t \dots \int_0^t}_{\nu} (C\hat{x} - y) d\tau^\nu.
 \end{aligned} \quad (3)$$

Macierze  $K$  oraz od  $K_1$  do  $K_\nu$  mają odpowiednie wymiary i stałe w czasie wartości elementów dobrane metodami opisanymi w pracy [2]. Przez  $\hat{x}$  oznaczono odtwarzany w obserwatorze wektor zmiennych stanu obiektu obserwowanego  $x$ .

### 3. Równanie błędu obserwatora proporcjonalnego z dodatkowymi integratorami

Równanie błędu jest podstawą do analizy właściwości dynamicznych obserwatora. Wektor błędów odtwarzania zmiennych stanu jest zdefiniowany jako:

$$\varepsilon = \hat{x} - x \quad (4)$$

Postać różniczkowo-całkową równania błędu obserwatora można wyprowadzić z równania (3), eliminując zmienne  $\hat{x}$  i  $x$  przy wykorzystaniu kolejno równań (4), (1) i (2). Aby doprowadzić otrzymane równanie do postaci normalnej, należy wykonać podstawienie wprowadzając dodatkowe wektory zmiennych stanu  $h_i$  o wymiarze  $z$ , zgodnie ze schematem:

$$t_{\text{odn}} \dot{h}_1 = K_1 C \varepsilon \quad (5)$$

$$t_{\text{odn}} \dot{h}_i = K_i C \varepsilon + h_{i-1}, \quad \text{dla } i = 2, \dots, \nu \quad (6)$$

Następnie, po zdefiniowaniu nowego wektora błędu  $\hat{\varepsilon}$  o wymiarze  $\hat{n} = n + \nu z$  i postaci:

$$\hat{\varepsilon} = \left[ \varepsilon^T \quad h_1^T \quad \dots \quad h_\nu^T \right]^T \quad (7)$$

można zapisać równanie błędu obserwatora w postaci normalnej:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{odn}} \dot{\hat{\varepsilon}} = & E(u) \hat{\varepsilon} + \hat{B}_1 d, \\
 \text{gdzie } E(u) = & \left( \hat{A} + \sum_{i=1}^p u_i \hat{A}_i + \hat{K} \hat{C} \right).
 \end{aligned} \quad (8)$$

Macierz  $E(u)$  o wymiarach  $\hat{n} \times \hat{n}$  jest to macierz stanu obserwatora z dodatkowymi integratorami. Kolejne macierze występujące w równaniu (8) mają postaci:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & \mathbf{0}_{n \times z(v-1)} & B_1 \\ \mathbf{0}_{z \times n} & \mathbf{0}_{n \times z(v-1)} & \mathbf{0}_{z \times z} \\ \mathbf{0}_{z(v-1) \times n} & I_{z(v-1)} & \mathbf{0}_{z(v-1) \times z} \end{bmatrix},$$

$$\hat{A}_i = \begin{bmatrix} A_i & \mathbf{0}_{n \times z\nu} \\ \mathbf{0}_{z\nu \times n} & \mathbf{0}_{z\nu \times z\nu} \end{bmatrix}, \quad \hat{B}_1 = \begin{bmatrix} -B_1 \\ \mathbf{0}_{z\nu \times z} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\hat{K} = [K^T \quad K_1^T \quad \dots \quad K_\nu^T]^T,$$

$$\hat{C} = [C \quad \mathbf{0}_{q \times z\nu}].$$

Przez  $\mathbf{0}_{i \times j}$  oznaczono macierz zerową o  $i$  wierszach oraz  $j$  kolumnach. Natomiast przez  $I_i$  oznaczono macierz jednostkową rzędu  $i$ .

#### 4. Obserwator proporcjonalny z dodatkowymi integratorami zmiennych stanu silnika indukcyjnego

Silnik indukcyjny klatkowy, jako maszyna monoharmoniczna, z jednym obwodem wirnika i liniowym obwodem magnetycznym, przy założeniu wolnozmienności prędkości obrotowej, jest opisany w prostokątnym, nieruchomym układzie współrzędnych  $\alpha$ - $\beta$  czterema równaniami różniczkowymi w wielkościach względnych [6]:

$$t_{\text{odn}} \dot{\psi}_{s\alpha} + R_s i_{s\alpha} = u_{s\alpha} \quad (10)$$

$$t_{\text{odn}} \dot{\psi}_{s\beta} + R_s i_{s\beta} = u_{s\beta} \quad (11)$$

$$t_{\text{odn}} \dot{\psi}_{r\alpha} + \omega \psi_{r\beta} + R_r i_{r\alpha} = 0 \quad (12)$$

$$t_{\text{odn}} \dot{\psi}_{r\beta} - \omega \psi_{r\alpha} + R_r i_{r\beta} = 0 \quad (13)$$

oraz czterema równaniami algebraicznymi:

$$\psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha} \quad (14)$$

$$\psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta} \quad (15)$$

$$\psi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha} \quad (16)$$

$$\psi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta} \quad (17)$$

W przypadku rozważanego obserwatora, napięcia uzwojenia stojana  $u_{s\alpha}$  i  $u_{s\beta}$  zostały potraktowane jako wymuszenia. Natomiast prądy uzwojenia stojana  $i_{s\alpha}$  oraz  $i_{s\beta}$  uznano za wyjścia. Strumienie magnetyczne sprzężone z uzwojeniami odpowiednio stojana  $\psi_{s\alpha}$ ,  $\psi_{s\beta}$  i wirnika  $\psi_{r\alpha}$ ,  $\psi_{r\beta}$  wybrano na zmienne stanu. Aby doprowadzić równania od (10) do (13) do postaci

(1) i (2), należy wyeliminować występujące w równaniach (12) i (13) prądy uzwojenia wirnika  $i_{r\alpha}$  oraz  $i_{r\beta}$ . W tym celu należy wykorzystać równania od (14) do (17). Pozostałe występujące w równaniach od (10) do (17) wielkości, są stałymi w czasie parametrami schematu zastępczego silnika. Wyjątkiem jest prędkość obrotowa  $\omega$ .

W tak zdefiniowanym modelu matematycznym silnika indukcyjnego założono, że prędkość obrotowa silnika  $\omega$  zmienia się znacznie wolniej niż pozostałe występujące w jego równaniach zmienne. Założenie to pozwoliło na wyłączenie z modelu silnika mechanicznego równania ruchu [6]. Równanie to zawiera silną nieliniowość i trudnomierzalne mechaniczne wymuszenia. W przypadku rozważanego obserwatora, pracującego jako element większego układu odtwarzania prędkości obrotowej, odtwarzana w tym układzie prędkość obrotowa  $\hat{\omega}$ , może zawierać szybkozmiennne zakłócenia. Zakłócenia te są skutkiem występowania błędów odtwarzania tej prędkości. Nie prowadzi to jednak do niespełnienia założenia wolnozmienności prędkości obrotowej. Odtwarzana prędkość obrotowa  $\hat{\omega}$  jest sumą szybkozmiennego zakłócenia  $\delta\omega$  o nieznanym, niemierzalnych wartościach i wolnozmiennym, rzeczywistej prędkości obrotowej  $\omega$ :

$$\hat{\omega} = \omega + \delta\omega \quad (18)$$

Po wstawieniu równania (18) do równań (12) i (13), można doprowadzić model matematyczny silnika do postaci opisanej równaniami (1) i (2), włączając iloczynny zakłócenia  $\delta\omega$  i strumieni wirnika  $\psi_{r\alpha}$  i  $\psi_{r\beta}$  do wektora niemierzalnych wymuszeń  $\mathbf{d}$ , który przyjmuje wtedy postać:

$$\mathbf{d} = [-\psi_{r\alpha} \delta\omega \quad \psi_{r\beta} \delta\omega]^T \quad (19)$$

Prędkość obrotową, będącą wielkością wejściową obserwatora, włączono do wektora wymuszeń:

$$\mathbf{u} = [u_{s\alpha} \quad u_{s\beta} \quad \omega]^T \quad (20)$$

Wektory wyjścia i zmiennych stanu przyjmują postaci:

$$\mathbf{y} = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]^T \quad (21)$$

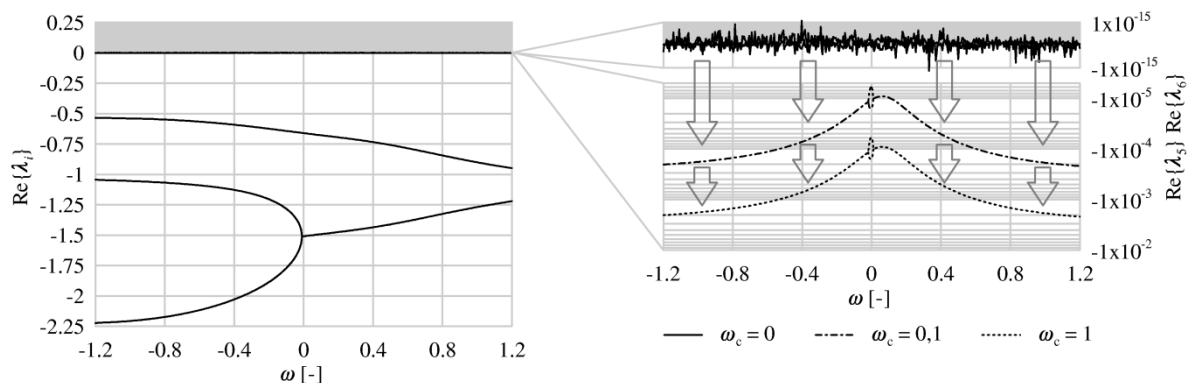
$$\mathbf{x} = [\psi_{s\alpha} \quad \psi_{s\beta} \quad \psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta}]^T \quad (22)$$

Tak zdefiniowany model matematyczny obiektu obserwowanego jest zgodny z założeniem wolnozmienności prędkości obrotowej, narzuconym przez zastosowany model matematyczny silnika indukcyjnego. Szybkozmiennie zakłócenie nałożone na przebieg prędkości obrotowej zostało zawarte w wektorze niemierzalnych wymuszeń  $\mathbf{d}$ , którego założenie wolnozmienności nie dotyczy. Co więcej, zawarte w strukturze obserwatora dodatkowe integratory są źródłem dodatkowego sygnału korekcyjnego, kompensującego skutki występowania zakłócenia prędkości obrotowej  $\delta\omega$ . Wpływa to na poprawę jakości odtwarzania zmiennych stanu, zawartych w wektorze  $\mathbf{x}$ . Dzięki temu obserwator z dodatkowymi integratorami zapewnia wysoką jakość odtwarzania strumieni magnetycznych silnika, nawet przy znacznej zawartości zakłóceń w podawanym na jego wejście przebiegu prędkości obrotowej.

Po wykonaniu odpowiednich przekształceń otrzymuje się postaci występujących w równaniach (1) i (2) macierzy, o wartościach elementów zależnych tylko od wartości parametrów schematu zastępczego silnika. W szczególności, macierze  $\mathbf{A}_1$  i  $\mathbf{A}_2$  są macierzami zerowymi, w związku z czym macierz stanu obserwatora (8) staje się funkcją tylko wolnozmiennnej prędkości obrotowej:

$$\mathbf{E}(\mathbf{u}) = \mathbf{E}(\omega) \quad (23)$$

która w trakcie doboru parametrów obserwatora może być traktowana jako parametr [2].



Rys. 2. Wpływ integratorów odpornych na składową stałą na wartości własne obserwatora

Obydwa te problemy można rozwiązać zastępując dodatkowe integratory układami całkującymi odpornymi na składową stałą (rys. 1b), szerzej opisanymi w pracach [8, 9]. W celu zapewnienia stabilności obserwatora, należy wartość

## 5. Problemy związane z praktyczną realizacją obserwatora z dodatkowymi integratorami

Możliwość wystąpienia problemów podczas praktycznej realizacji dodatkowych integratorów wynika wprost z równań (5) i (6). W każdym z tych równań, występujący w pochodnej po lewej stronie równania wektor zmiennych stanu  $\mathbf{h}_i$  związany z  $i$ -tym dodatkowym integratorem, nie występuje po prawej stronie równania. Oznacza to, że wartości pochodnych zmiennych stanu  $i$ -tego integratora nie są związane z wartościami tych zmiennych. W związku z tym, jeżeli na wejściu integratora pojawi się sygnał zawierający składową stałą, na jego wyjściu pojawi się sygnał narastający do nieskończoności w nieograniczony sposób. W praktyce, składowa stała do przebiegów wejściowych obserwatora może być wprowadzana np. przez przetwornik pomiarowy z dрифtem zera. W praktycznej realizacji, przy wykorzystaniu procesora sygnałowego, po odpowiednio długim czasie spowoduje to powstanie błędów numerycznych.

Drugi problem jest związany ze stabilnością obserwatora. Można wykazać, że dla przyjętego modelu silnika, co najmniej dwie wartości własne macierzy  $\mathbf{E}(\omega)$  są zawsze równe zero. Twierdzenie to jest prawdziwe dla dowolnych wartości prędkości obrotowej  $\omega$  i elementów macierzy  $\mathbf{K}$ . Obserwator nie spełnia więc warunku koniecznego i wystarczającego stabilności (twierdzenie 8.1 w pracy [7], rys. 2 dla  $\omega_c = 0$ ).

ograniczenia  $\eta$  integratora odpornego na składową stałą ustawić stale na 0, a wartość pulsacji  $\omega_c$  na wartość większą od zera. Odpowiednio dobrana wartość pulsacji  $\omega_c$  [9] zapewni również optymalne warunki tłumienia składowej

stałej. Po zastąpieniu dodatkowych integratorów układami całkującymi odpornymi na składową stałą, równania (5) i (6) przyjmują odpowiednio postaci:

$$t_{\text{odn}} \dot{\mathbf{h}}_1 = \mathbf{K}_1 \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} - t_{\text{odn}} \omega_{c1} \mathbf{h}_1 \quad (24)$$

$$t_{\text{odn}} \dot{\mathbf{h}}_i = \mathbf{K}_i \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{h}_{i-1} - t_{\text{odn}} \omega_{ci} \mathbf{h}_i \quad (25)$$

dla  $i = 2 \dots \nu$ .

Przez  $\omega_{ci}$  oznaczono pulsację  $\omega_c$  dla  $i$ -tego integratora. Zmianie ulega również postać macierzy stanu obserwatora:

$$\hat{\mathbf{E}}(\mathbf{u}) = \mathbf{E}(\mathbf{u}) - \mathbf{I}_{\hat{n}} \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times 1} \\ t_{\text{odn}} \omega_{c1} \mathbf{I}_{z \times 1} \\ \vdots \\ t_{\text{odn}} \omega_{c\nu} \mathbf{I}_{z \times 1} \end{bmatrix} \quad (26)$$

gdzie  $\mathbf{I}_{ij}$  oznacza wypełnioną jedynekami macierz o podanych wymiarach.

Wpływ dodatkowych integratorów odpornych na składową stałą na wartości własne wykorzystanego do badań obserwatora z jednym dodatkowym integratorem przedstawiono na rysunku 2. Zmiany wartości  $\omega_c$  mają wpływ na wartości wszystkich wartości własnych obserwatora. W przypadku jednak wartości własnych o wartościach pierwotnie różnych od zera wpływ ten jest bardzo niewielki, niewidoczny na rysunku 2. Po wprowadzeniu integratorów odpornych na składową stałą, stabilność obserwatora zależy tylko od odpowiedniego doboru wartości elementów macierzy  $\hat{\mathbf{K}}$  [2].

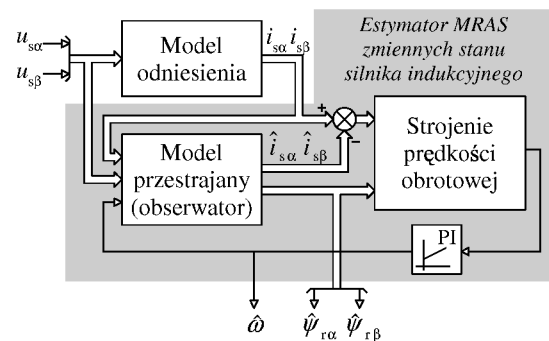
## 6. Badania laboratoryjne obserwatora z dodatkowymi integratorami

Obserwator proporcjonalny z jednym dodatkowym integratorem przebadano w multiskalarnym układzie sterowania silnika indukcyjnego [10]. Układ sterowania działa w oparciu o multiskalarne zmienne stanu, spośród których zmienna  $x_{12}$  ma wartość proporcjonalną do momentu elektromagnetycznego silnika  $m_e$ , a zmienna  $x_{21}$  ma wartość równą kwadratowi modułu strumienia wirnika silnika  $\psi_r$ . Jakość odtwarzania w obserwatorze zmiennych stanu ma bezpośredni wpływ na działanie układu sterowania. Ewentualne zaburzenia widoczne w przebiegu zmiennej  $x_{21}$ , której wartość powinna być stale równa wartości zadanej [10],

świadczą o występowaniu błędów odtwarzania strumieni magnetycznych.

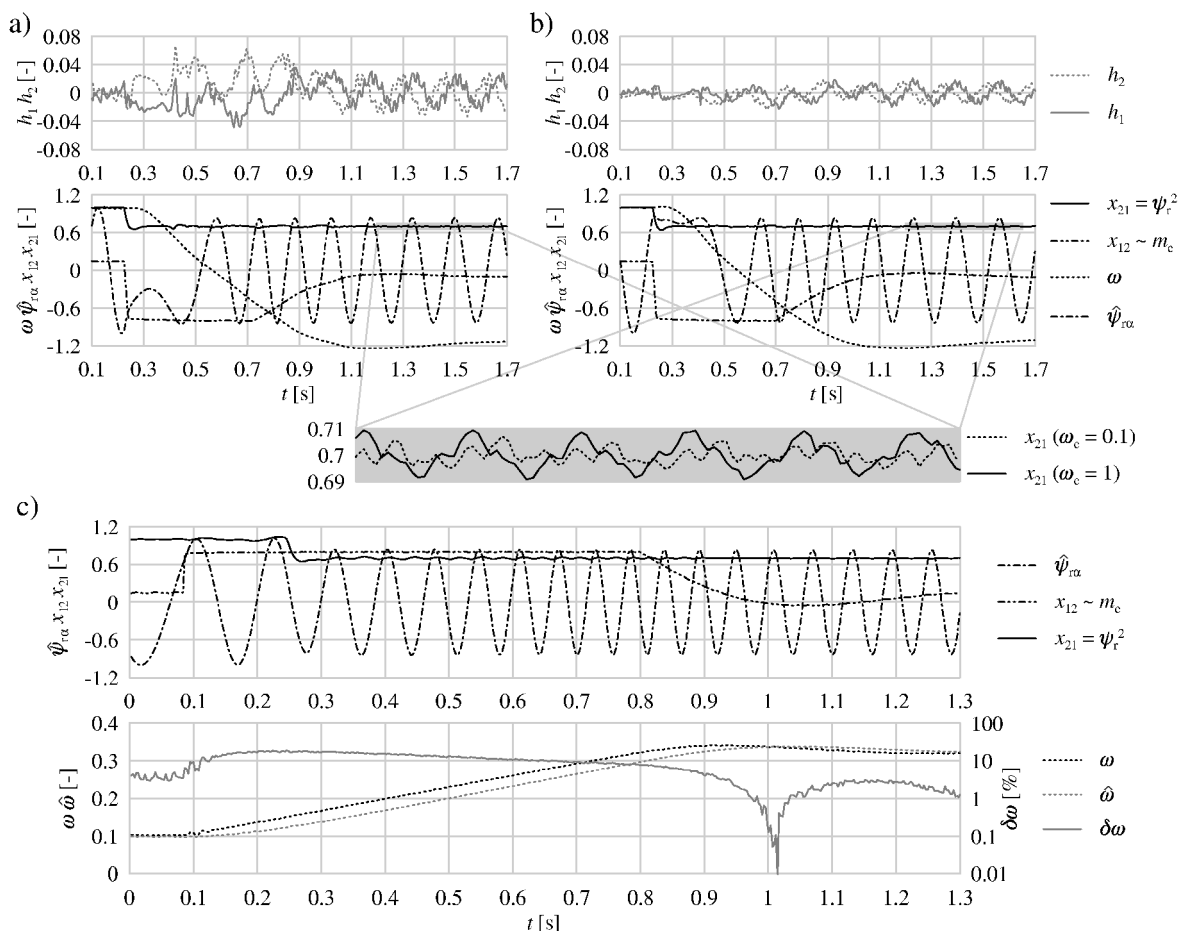
Na rysunkach 4a i 4b przedstawiono przebiegi zarejestrowane podczas nawrotu silnika. Układ sterowania był wyposażony w obserwator z jednym dodatkowym integratorem. Prędkość obrotowa podawana na wejście obserwatora była odtwarzana w dodatkowym obserwatorze prędkości obrotowej [10]. Wyniki przedstawione na rysunku 4a otrzymano dla  $\omega_c = 0,1$ , a na rysunku 4b dla  $\omega_c = 1$ . Z wykresów wynika, że zwiększanie wartości  $\omega_c$  powoduje zmniejszenie wartości sygnałów wyjściowych dodatkowego integratora  $h_1$  i  $h_2$  (co wynika z równań (24) i (25)), a przez to osłabienie korekcji zakłóceń. Skutkuje to pogorszeniem jakości odtwarzania strumieni magnetycznych silnika i zwiększeniem zawartości zaburzeń w przebiegu zmiennej  $x_{21}$ , widocznych na powiększonym fragmencie rysunków 4a i 4b.

Na rysunku 4c przedstawiono przebiegi zarejestrowane w trakcie skokowego zwiększenia wartości zadanej prędkości obrotowej i zadanej wartości  $x_{21}$  w układzie sterowania z estymatorem typu MRAS o strukturze podanej na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy estymatora typu MRAS

W zastosowanym estymatorze MRAS rolę modelu odniesienia pełni silnik indukcyjny, więc na rysunku 3 wyłączono ten model ze struktury estymatora [3, 4]. Z zarejestrowanych przebiegów wynika, że układ sterowania pracuje stabilnie nawet przy 20% błędach odtwarzania prędkości obrotowej. Stosunkowo niewielka zawartość zaburzeń w przebiegu zmiennej  $x_{21}$  świadczy o dobrej jakości odtwarzania strumieni magnetycznych silnika.



Rys. 4. Wyniki badań laboratoryjnych: obserwatora z jednym dodatkowym integratorem dla  $\omega_c = 0,1$  (a), oraz  $\omega_c = 1$  (b); estymatora typu MRAS (c)

## 7. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że proporcjonalny obserwator z dodatkowymi integratorami zmiennych stanu silnika indukcyjnego, zapewnia dobrą jakość odtwarzania strumieni magnetycznych, nawet w przypadku występowania znacznych zakłóceń przebiegu prędkości obrotowej podawanej na wejście obserwatora.

## 8. Literatura

- [1] Orłowska-Kowalska T.: *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003
- [2] Żywiec A., Białoń T.: *Synteza obserwatora sprzężeń elektromagnetycznych silnika indukcyjnego przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych*. SME 2003, Gdańsk – Jurata, CD
- [3] Niestrój R., Białoń T.: *Estymator typu MRAS z proporcjonalnym obserwatorem Luenbergera do odtwarzania zmiennych stanu silnika indukcyjnego*. SME 2008, Wrocław, ss. 372-377
- [4] Orłowska-Kowalska T., Dybkowski M.: *Właściwości bezczujnikowego napędu indukcyjnego*

*z nowym estymatorem MRAS prędkości i strumienia wirnika*. SME 2006, Kraków, ss. 127-130

- [5] Guo-Ping J., Suo-Ping W., Wen-Zhong S.: *Design of observer with integrators for linear systems with unknown input disturbances*. Electronics Letters, 2000, No. 13, pp. 1168 – 1169
- [6] Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Helion, Gliwice 1998
- [7] Kaczorek T.: *Teoria sterowania i systemów*. PWN, Warszawa 1999
- [8] Hu J., Wu B.: *New Integration Algorithms for Estimating Motor Flux over a Wide Speed Range*. IEEE Trans. On Power Electronics, No. 5, 1998, pp. 969-977
- [9] Białoń T., Lewicki A., Pasko M.: *Zastosowanie układów całkujących odpornych na składową stałą w całkującym obserwatorem zmiennych stanu silnika indukcyjnego*. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 11, 2008, ss. 12-16
- [10] Krzeminski Z., Lewicki A., Włas M.: *Properties of sensorless control systems based on multiscale models of the induction motor*, COMPEL, No. 1, 2006, pp. 195-206