

## Analiza porównawcza zakresów stabilności wybranych estymatorów prędkości silnika indukcyjnego typu MRAS

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zostało porównanie zakresów stabilności estymatorów prędkości MRAS<sup>CV</sup> oraz MRAS<sup>CC</sup> jak również estymatora MRAS<sup>CC</sup> z zastosowaniem metody poprawy stabilności w generatorowym trybie pracy. Analiza teoretyczna potwierdzona została wynikami badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

**Abstract.** In this article a comparison of stability ranges of speed estimators MRAS<sup>CV</sup> and MRAS<sup>CC</sup>, as well estimator MRAS<sup>CC</sup> with application of stability extension method in regenerating mode was presented. Theoretical analysis was validate by simulation and experimental result. (Comparative analysis of stability ranges of selected induction motor speed estimators type MRAS).

**Słowa kluczowe:** estymator typu MRAS, silnik indukcyjny, analiza stabilności, generatorowy tryb pracy.

**Keywords:** type MRAS estimator, induction motor, stability analysis, regenerating mode.

### Wstęp

W ostatnich kilku dekadach bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi (SI) przyciągają uwagę ze względu na wiele zalet takich jak: niższe koszty, zmniejszenie miejsca dysponowanego na napęd (mniejsza liczba kabli i czujników), większa niezawodność, zwiększona wytrzymałość mechaniczna oraz możliwość pracy w nieprzyjawnym środowisku. Istotną cechą takich układów jest konieczność estymacji zmiennych stanu silnika indukcyjnego.

W literaturze zaproponowanych zostało wiele metod oraz technik estymacji dla bezczujnikowych układów sterowania SI [1-3]. Szczegółowy podział metod estymacji prędkości silnika indukcyjnego został przedstawiony w [4]. Najczęściej analizowaną w literaturze grupą są metody algorytmiczne, do których można zaliczyć obserwatory zmiennych stanu (w szczególności adaptacyjny obserwator pełnego rzędu – AFO – Adaptive Full Order Observer) [5], filtr Kalmana [6] oraz symulatory zmiennych stanu (zwłaszcza estymatory typu MRAS – Model Reference Adaptive System) [7-13].

Estymatory typu MRAS wykorzystują technikę układów adaptacyjnych. Do tej grupy można zaliczyć takie estymatory jak MRAS<sup>F</sup> (F – flux) [7], MRAS<sup>EMF</sup> (EMF – electromotive force) [8], MRAS<sup>RP</sup> (RP – reactive power) [8], MRAS<sup>CV</sup> (C – current, V – voltage) [9], MRAS<sup>CC</sup> (C – current, C – current) [10], SM-MRAS (Sliding Mode MRAS) [11] i wiele innych [12]. Główna różnica pomiędzy nimi polega na estymowanych wewnętrznych zmiennych stanu, na podstawie których obliczany jest błąd wprowadzany do mechanizmu adaptacji. Ogólny przegląd tych metod został przedstawiony w [13]. Do grupy estymatorów typu MRAS można zaliczyć również AFO [5] ze względu na cechy wspólne z estymatorami MRAS<sup>CC</sup> i MRAS<sup>CV</sup>, takie jak: taka sama postać błędu wprowadzana na mechanizm adaptacji oraz przyjęcie silnika indukcyjnego jako modelu odniesienia.

W przypadku obserwatora AFO powstało wiele artykułów, w których omówiona została jego stabilność oraz zostały zaproponowane metody jej poprawy w generatorowym trybie pracy, m.in. [14-17]. W powyższych artykułach zostały również omówione różne metody poprawy stabilności tego estymatora (wprowadzenie odpowiedniej macierzy wzmocnień bądź kąta przesunięcia między wektorem strumienia wirnika i wektorem błędu estymacji prądu stojana) w szczególności w generatorowym trybie pracy (także w zakresie osłabiania strumienia). Dla estymatora MRAS<sup>CC</sup> takich artykułów powstało niewiele [4], [18-20]. W przypadku estymatora MRAS<sup>CV</sup>, jak do tej pory

nie wykonano analizy stabilności w generatorowym trybie pracy. Przeprowadzona została jedynie analiza stabilności w zakresie pracy silnikowej w przypadku błędnej identyfikacji parametrów schematu zastępczego SI [21]. Z przedstawionej tam analizy wynika, że spośród estymatorów: MRAS<sup>CC</sup>, MRAS<sup>CV</sup>, AFO i MRAS<sup>F</sup>, najbardziej odporny na wpływ błędnej identyfikacji parametrów jest MRAS<sup>CC</sup>.

W niniejszym artykule przedstawiono analizę stabilności estymatora MRAS<sup>CV</sup>, w szczególności w generatorowym trybie pracy. Ponadto porównano stabilność estymatorów MRAS<sup>CV</sup>, MRAS<sup>CC</sup> oraz MRAS<sup>CC</sup> z zastosowaniem metody poprawy stabilności poprzez dobór odpowiedniej wartości kąta przesunięcia wykorzystywanego w algorytmie adaptacji. W pierwszym rozdziale przedstawione zostały modele matematyczne silnika indukcyjnego oraz analizowanych estymatorów typu MRAS. W kolejnym przedstawiona została szczegółowa analiza stabilności, która została potwierdzona w następnym rozdziale wynikami badań teoretycznych, symulacyjnych oraz eksperymentalnych. Artykuł zakończono krótkim podsumowaniem otrzymanych wyników.

### Modele matematyczne

Analizowane estymatory prędkości kątowej bazują na modelu matematycznym silnika indukcyjnego. W tym artykule model ten przedstawiony jest przy uwzględnieniu powszechnie stosowanych założeń upraszczających, oraz z wykorzystaniem zapisu za pomocą wektorów przestrzennych wyrażonych w jednostkach względnych, w układzie współrzędnych wirującym synchronicznie ze strumieniem wirnika [1-2]. Równanie stanu obwodów elektromagnetycznych SI przedstawia się następująco:

$$(1) \quad T_N \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \boldsymbol{\psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_l}{l_\sigma} - j\omega_s & \left( \frac{k_r}{l_\sigma \tau_r} - j\frac{k_r}{l_\sigma} \omega_m \right) \\ r_r k_r & \left( -\frac{1}{\tau_r} - j(\omega_s - \omega_m) \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \boldsymbol{\psi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{l_\sigma} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}_s$$

gdzie:  $k_r = l_m/l_r$ ,  $l_\sigma = l_s \sigma$ ,  $r_l = r_s + r_r k_r^2$ ,  $\tau_r = l_r/r_r$ ,  $T_N = 1/(2\pi f_{sN})$ ,  $\mathbf{i}_s$ ,  $\mathbf{u}_s$ ,  $\boldsymbol{\psi}_r$  – wektory prądu stojana, napięcia stojana i strumienia wirnika,  $l_r$ ,  $l_s$ ,  $l_m$  – indukcyjność wirnika, stojana, magnesująca,  $r_s$ ,  $r_r$  – rezystancja stojana i wirnika,  $\sigma$  – współczynnik całkowitego rozproszenia maszyny,  $\omega_s$  – pulsacja w stojanie,  $\omega_r = \omega_s - \omega_m$  – pulsacja poślizgu,  $f_{sN}$  – częstotliwość znamionowa stojana.

Estymator prędkości kątowej silnika indukcyjnego MRAS<sup>CC</sup> [10] składa się z modelu symulatora prądowego,

modelu estymatora prądu stojana oraz mechanizmu adaptacji (regulator PI). Schemat tego estymatora przedstawiono na rysunku 1a. Oba modele są adaptowalne estymowaną wartością prędkości. Równanie modelu symulatora prądowego jest następujące:

$$(2) \quad \frac{d}{dt} \hat{\psi}_r^i = \left( -\frac{1}{\tau_r} - j(\omega_s - \hat{\omega}_m) \right) \hat{\psi}_r^i + r_r k_r \mathbf{i}_s$$

Równanie modelu estymatora prądu stojana przedstawia się następująco:

$$(3) \quad \frac{d}{dt} \hat{\mathbf{i}}_s = \left( -\frac{r_s}{l_\sigma} - j\omega_s \right) \hat{\mathbf{i}}_s + \left( \frac{k_r}{l_\sigma \tau_r} - j \frac{k_r}{l_\sigma} \hat{\omega}_m \right) \hat{\psi}_r + \frac{1}{l_\sigma} \mathbf{u}_s$$

W celu analizy stabilności estymator ten można przedstawić za pomocą równania stanu:

$$(4) \quad T_N \frac{d\hat{\mathbf{x}}}{dt} = \hat{\mathbf{A}}^{CC}(\hat{\omega}_m) \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_1 \mathbf{u} + \mathbf{K}_1 \mathbf{y};$$

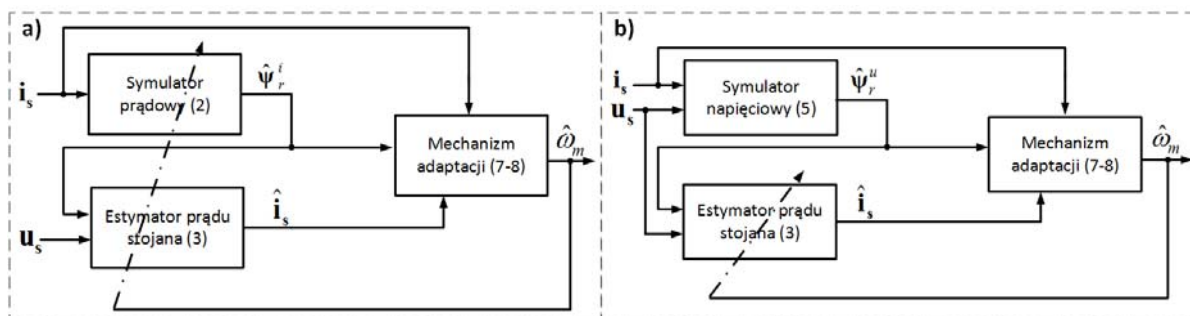
gdzie:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_s \\ \hat{\psi}_r \end{bmatrix}; \quad \hat{\mathbf{A}}^{CC}(\hat{\omega}_m) = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{l_\sigma} - j\omega_s & \frac{k_r}{l_\sigma \tau_r} - j \frac{k_r}{l_\sigma} \hat{\omega}_m \\ 0 & -\frac{1}{\tau_r} - j(\omega_s - \hat{\omega}_m) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{l_\sigma} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ r_r k_r & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ 0 \end{bmatrix}$$

Drugim estymatorem prędkości analizowanym w tym artykule jest estymator MRAS<sup>CV</sup> [9], którego schemat blokowy został przedstawiony na rysunku 1b. W porównaniu do estymatora MRAS<sup>CC</sup> pojawia się jedna różnica: adaptowany model symulatora prądowego zastąpiony jest nieadaptowanym (niezależnym od prędkości kątownej wirnika) modelem symulatora napięciowego:

$$(5) \quad \frac{d}{dt} \hat{\psi}_r^u = -j\omega_s \hat{\psi}_r^u + \left( -\frac{r_s}{k_r} - T_N \frac{l_\sigma}{k_r} \frac{d}{dt} - j \frac{l_\sigma}{k_r} \omega_s \right) \mathbf{i}_s + \frac{1}{k_r} \mathbf{u}_s$$



Rys.1. Schematy blokowe estymatorów typu MRAS: a) MRAS<sup>CC</sup>, b) MRAS<sup>CV</sup>

### Analiza stabilności estymatorów MRAS<sup>CV</sup> i MRAS<sup>CC</sup>

W celu przeprowadzenia analizy stabilności należy szczegółowo przeanalizować 5 kroków następującego algorytmu [20]:

- Zapisanie pełnego modelu estymatora – czyli rozszerzenie równań stanu o równanie mechanizmu adaptacji.
- Linearyzacja wokół ustalonego punktu pracy – wyznaczenie błędu estymacji poprzez odjęcie modelu estymatora od modelu silnika (w celu poprawnej analizy stabilności estymatora MRAS<sup>CV</sup> po odpowiednich przekształceniach modelu matematycznego SI,

Równanie stanu estymatora MRAS<sup>CV</sup> można przedstawić w następującej postaci:

$$(6) \quad T_N \frac{d\hat{\mathbf{x}}}{dt} = \hat{\mathbf{A}}^{CV}(\hat{\omega}_m) \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_2 \mathbf{u} + \mathbf{K}_2 \mathbf{y};$$

gdzie:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_s \\ \hat{\psi}_r \end{bmatrix}; \quad \hat{\mathbf{A}}^{CV}(\hat{\omega}_m) = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{l_\sigma} - j\omega_s & \frac{k_r}{l_\sigma \tau_r} - j \frac{k_r}{l_\sigma} \hat{\omega}_m \\ 0 & -j\omega_s \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{l_\sigma} \\ \frac{1}{k_r} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{r_s}{k_r} - T_N \frac{l_\sigma}{k_r} \frac{d}{dt} - j \frac{l_\sigma}{k_r} \omega_s & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ 0 \end{bmatrix}$$

W obu estymatorach wartość prędkości kątownej jest obliczana za pomocą regulatora typu PI:

$$(7) \quad \frac{d}{dt} \hat{\omega}_m = -K_i \varepsilon - K_p \frac{d}{dt} \varepsilon$$

Wartość błędu  $\varepsilon$  wprowadzana do mechanizmu adaptacji zależy od estymowanej wartości strumienia wirnika oraz od błędu estymacji prądu stojana:

$$(8) \quad \varepsilon = \mathfrak{I} \{ \mathbf{e}_i \hat{\psi}_r^* \} = \hat{\psi}_{rx} e_{iy} - \hat{\psi}_{ry} e_{ix},$$

gdzie:  $e_{ix,y} = i_{sx,y} - \hat{i}_{sx,y}$

Dla estymatora MRAS<sup>CC</sup>, w celu poprawy stabilności w zakresie pracy generatorowej, błąd wprowadzany na mechanizm adaptacji został zmodyfikowany o kąt przesunięcia pomiędzy wektorami strumienia wirnika i błędu estymacji prądu stojana [4],[19-20]:

$$(9) \quad \varepsilon = \mathfrak{I} \{ e^{-j\varphi} \mathbf{e}_i \hat{\psi}_r^* \} = \hat{\psi}_{rx} e_{iy} \cos \varphi - \hat{\psi}_{rx} e_{ix} \sin \varphi - \hat{\psi}_{ry} e_{ix} \cos \varphi - \hat{\psi}_{ry} e_{iy} \sin \varphi$$

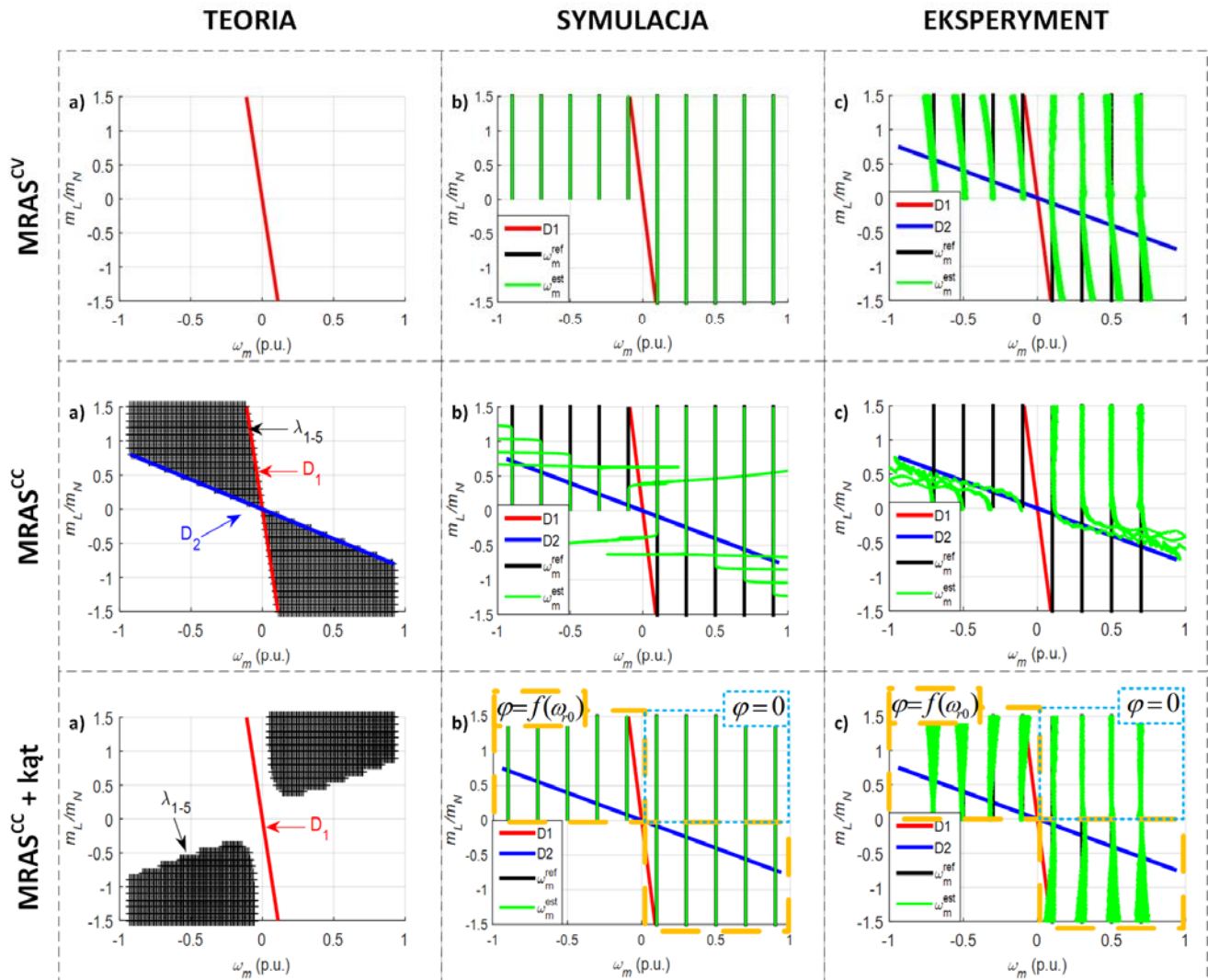
równania strumieniowe przedstawione zostały za pomocą modelu napięciowego).

- Wyznaczenie wartości własnych (biegunów estymatora) ze zlinearyzowanej macierzy stanu – obliczenie rozwiązań równania charakterystycznego.
- Analiza znaku części rzeczywistych wszystkich biegunów estymatora w ustalonych punktach pracy – dodatnia część rzeczywista któregokolwiek bieguna świadczy o niestabilnym punkcie pracy.
- Wyznaczenie granic niestabilności na podstawie przyrównania wyznacznika zlinearyzowanej macierzy stanu do zera.



właściwościami tego estymatora w porównaniu z estymatorem MRAS<sup>CV</sup>. Jednakże, po zastosowaniu odpowiedniej metody poprawy stabilności (11) dla estymatora MRAS<sup>CC</sup>, można zniwelować ten przedział do prostej D1. Wadą tej metody jest pojawienie się niestabilnych punktów pracy w zakresie pracy silnikowej. Tej negatywnej cechy estymatora można się pozbyć poprzez przełączanie wartości kąta z (11) na wartość zerową, przy przejściu z pracy generatorowej do silnikowej i odwrotnie. Wyniki symulacyjne (rys. 4b – cała kolumna) potwierdzają wszystkie omawiane właściwości analizowanych estymatorów. Dla MRAS<sup>CC</sup> z wykorzystaniem metody poprawy stabilności zastosowano przełączanie wartości kąta przy przechodzeniu z pracy

generatorowej do silnikowej i odwrotnie, co zostało zaznaczone na wykresie. Dopiero tak zaprojektowany estymator MRAS<sup>CC</sup> wykazuje takie same właściwości co do zakresu stabilności jak estymator MRAS<sup>CV</sup>. Wyniki eksperymentalne (rys. 4c – cała kolumna) również potwierdzają wszystkie właściwości omawianych estymatorów. Warto zwrócić uwagę, że dla MRAS<sup>CV</sup> w zakresie pracy generatorowej, wraz ze wzrostem momentu obciążenia pojawia się błąd estymacji prędkości, zaś dla MRAS<sup>CC</sup> z metodą poprawy stabilności pojawiają się większe oscylacje. Podczas całej analizy współczynniki mechanizmu adaptacji wyniosły odpowiednio:  $K_p=1$ ,  $K_i=30T_N$ .



Rys.4. Wykresy zależności prędkości od momentu obciążenia: wyniki teoretyczne (a), symulacyjne (b) i eksperymentalne (c) dla estymatorów MRAS<sup>CV</sup> (wiersz pierwszy), MRAS<sup>CC</sup> (wiersz drugi) i MRAS<sup>CC</sup> z zastosowaniem metody poprawy stabilności (wiersz trzeci).

#### Podsumowanie

Szczegółowa analiza stabilności estymatorów MRAS<sup>CV</sup> oraz MRAS<sup>CC</sup> pozwala na jednoznaczne stwierdzenie, że estymator MRAS<sup>CV</sup> cechuje się stabilną pracą zarówno w zakresie pracy silnikowej jak i generatorowej, w przypadku poprawnie zidentyfikowanych parametrów schematu zastępczego SI. Zastosowanie odpowiedniej metody poprawy stabilności dla estymatora MRAS<sup>CC</sup> pozwala na osiągnięcie takich samych cech obu estymatorów w przypadku analizy teoretycznej oraz wyników badań symulacyjnych. Z badań eksperymentalnych wynika, że istotną cechą estymatora MRAS<sup>CV</sup> jest pojawianie się błędów ustalonych odtwarzanej prędkości kątowej wraz

ze wzrostem momentu obciążenia, zaś znaczącą właściwością estymatora MRAS<sup>CC</sup> z zastosowaną metodą poprawy stabilności (8) i (11) jest konieczność korygowania wartości kąta  $\varphi$  podczas zmiany trybu pracy silnika indukcyjnego. Powyższe właściwości oznaczają, że w warunkach rzeczywistych estymator MRAS<sup>CC</sup> zachowuje lepsze właściwości niż estymator MRAS<sup>CV</sup>.

## Załączniki

Tabela 1. Parametry silnika

Parametr	Wartość [j.fiz.]
Moc znamionowa	$P_N = 1.1$ [kW]
Moment znamionowy	$M_N = 7.557$ [N]
Napięcie znamionowe	$U_N = 230$ [V]
Prąd znamionowy	$I_N = 2.5$ [A]
Prędkość znamionowa	$n_n = 1390$ [obr/min]
Indukcyjność magnesująca	$L_m = 424.60$ [mH]
Indukcyjność stojana/wirnika	$L_s = L_r = 398.38$ [mH]
Rezystancja stojana	$R_s = 5.019$ [ $\Omega$ ]
Rezystancja wirnika	$R_r = 6.497$ [ $\Omega$ ]
Strumień wirnika	$\Psi_r = 0.8428$ [Wb]
Częstotliwość	$f_{sN} = 50$ [Hz]
Liczba par biegunów	$p_b = 2$

Współczynniki zlinearyzowanej macierzy stanu przedstawiają się następująco:

$$\begin{aligned}
 a_{51} &= -\psi_{ref} \sin \varphi \left[ K_i - K_p \left( \frac{r_i}{l_\sigma} + g_{sx} \right) \right] - K_p \psi_{ref} (\omega_{s0} + g_{sy}) \cos \varphi \\
 (11) \quad a_{52} &= \psi_{ref} \cos \varphi \left[ K_i - K_p \left( \frac{r_i}{l_\sigma} + g_{sx} \right) \right] - K_p \psi_{ref} (\omega_{s0} + g_{sy}) \sin \varphi \\
 a_{53} &= -\frac{K_p \psi_{ref} k_r \omega_{m0} \cos \varphi}{l_\sigma} - \frac{K_p \psi_{ref} k_r \sin \varphi}{\tau_r l_\sigma} \\
 a_{54} &= \frac{K_p \psi_{ref} k_r \cos \varphi}{\tau_r l_\sigma} - \frac{K_p \psi_{ref} k_r \omega_{m0} \sin \varphi}{l_\sigma} \\
 a_{55} &= -\frac{K_p \psi_{ref}^2 k_r \cos \varphi}{l_\sigma}
 \end{aligned}$$

Praca finansowana częściowo przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu UMO-2015/17/B/ST7/03846 oraz w ramach badań statutowych Katedry Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej (projekt 0401/0112/17)

**Autor:** mgr inż. Mateusz Korzonek, Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, E-mail: mateusz.korzonek@pwr.edu.pl

## LITERATURA

- [1] Orłowska Kowalska T., Bezcujnikowe układy napędowe, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, (2003)
- [2] Kaźmierkowski M. P., Blaabjerg F. and Kirshnan R., Control in Power Electronic – Selected Problems, *Academic Press*, (2002)
- [3] Holtz J., Sensorless Control of Induction Machines – With or Without Signal Injection?, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 53, (2006), n.1, 7-30
- [4] Korzonek M., Orłowska-Kowalska T., Analiza stabilności estymatora prędkości MRASCC podczas osłabienia strumienia w generatorowym trybie pracy napędu indukcyjnego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93, (2017), n.5, 152-157
- [5] Kubota H, Matsuse K. and Nakano T., DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 29, (1993), n.2, 344-348
- [6] Barut M., Bogosyan S. and Gokasan M., Speed-sensorless estimation for induction motors using Extended Kalman filters, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 54, (2007), n.1, 272-280
- [7] Schauder C., Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 28, (1992), n.5, 1054-1061
- [8] Peng F. Z. and Fukao T., Robust speed identification for speed-sensorless vector control of induction motors, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 30, (1994) n.5, 1234-1240
- [9] Sobczuk D., Application of ANN for control of PWM inverter fed induction motor drives, Ph.D. dissertation, Warsaw Univ. of Technology, (1999)
- [10] Dybkowski M. and Orłowska-Kowalska T., Application of the stator current-based MRAS speed estimator in the sensorless induction motor drive, 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC, (2008), 2306-2311
- [11] Verma V. and Chakraborty Ch., New series of MRAS for speed estimation of vector controlled induction motor drive, in Proc. 40th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON), (2014), 755-761
- [12] Tarchała G., Orłowska-Kowalska T. and Dybkowski M., Sliding-mode direct torque control and sliding-mode observer with a magnetizing reactance estimator for the field-weakening of the induction motor drive, *Math. Comput. Simul.*, 98, (2014), 31-45
- [13] Kumar R., Das S., Syam P. and Chattopadhyay A. K., Review on model reference adaptive system for sensorless vector control of induction motor drives, *IET Electr. Power Appl.*, 9, (2015), n.7, 496-511
- [14] Kubota H., Satao I, Tamura Y, et al., Regenerating-mode low-speed operation of sensorless induction motor drive with adaptive observer, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 38, (2002), n.4, 1081-1086
- [15] Sunwankawin S. and Sangwongwanich S., Design strategy of an adaptive full-order observer for speed-sensorless induction motor drive – Tracking performance and stabilization, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 53, (2006), n.1, 96-119
- [16] Hinkkanen M. and Luomi J., Stabilization of regenerating-mode operation in sensorless induction motor drives by full-order flux observer design, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 51, (2004), n.6, 1318-1328
- [17] Etien E., Chainge C. and Bensiali N., On the Stability of Full Adaptive Observer for Induction Motor in Regenerating Mode, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57, (2010), n.5, 1599-1608
- [18] Vonkomer J. and Zalman M., On the stability of current based MRAS, in Proc. 39th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON), (2013), 3018-3023
- [19] Korzonek M., Orłowska-Kowalska T., Stability analysis of MRASCC speed estimator in motoring and regenerating mode, *Power Electronics and Drives*, 1(36), (2016), n.2, 113-131
- [20] Korzonek M., Orłowska-Kowalska T., Tarchała G., Stability analysis of selected speed estimators for induction motor drive in regenerating mode: a comparative study, *IEEE Trans. on Ind. Electron.* (2017), 1-10, (early access)
- [21] Orłowska-Kowalska T., Dybkowski M., Stator current-based MRAS speed estimator for wide range speed sensorless induction motor drive, *IEEE Trans Ind. Electron.*, 57, (2010), n.4, 1296-1308