

Wpływ błędów parametrów modelu maszyny indukcyjnej na działanie rozszerzonego obserwatora prędkości

Streszczenie. W artykule opisano metodę odtwarzania prędkości wirnika maszyny indukcyjnej przy wykorzystaniu rozszerzonego obserwatora prędkości. Zbadano wpływ błędów parametrów modelu maszyny indukcyjnej na właściwości dynamiczne obserwatora poprzez porównanie macierzy stanu obserwatora obciążonego oraz nieobciążonego błędami parametrów. Zbadano także wpływ błędów parametrów na jakość odtwarzania zmiennych maszyny w stanie ustalonym.

Abstract. The subject of this paper is analysis of influence of induction motor model parameters errors on extended speed observer. Based on linearized equations of dynamics of speed observer errors a state matrix of the observer has been proposed. It has been concluded that dynamics of the observer depends on parameter values present in the equations of the observer and is not affected by parameters errors. Series of simulation results have shown that parameters errors have impact on rotor speed estimation quality in steady state. Influence of stator and rotor resistance as well as magnetizing and leakage inductance errors has been investigated. (**Analysis of model parameters errors in induction machine extended speed observer**).

Słowa kluczowe: obserwator prędkości, maszyna indukcyjna, błędy parametrów, błędy ustalone.

Keywords: speed observer, induction machine, model parameters errors, steady state errors.

Wstęp

Maszyny indukcyjne są w przemyśle jednymi z głównych odbiorników energii elektrycznej. W prostych urządzeniach, jak wentylatory, pompy itp., wystarczające jest zastosowanie napędów pracujących w otwartym układzie regulacji. Do bardziej zaawansowanych zastosowań, gdzie wymagane jest zapewnienie dobrych właściwości dynamicznych napędu oraz dokładność w stanie ustalonym, stosuje się zamknięte układy regulacji, co wiąże się z koniecznością pomiaru wybranych wielkości. W przypadku wektorowych układów sterowania (np. Field Oriented Control) oprócz prędkości wirnika konieczna jest także znajomość składowych wektora strumienia. Ze względu na koszty oraz trudności techniczne w realizacji pomiaru strumienia w maszynie indukcyjnej wielkość tę odtwarza się w obserwatorze na podstawie łatwo mierzalnych prądów stojana. Chociaż prędkość wirnika stosunkowo łatwo można zmierzyć przy zastosowaniu np. enkodera optycznego, można ją także odtwarzać w obserwatorze prędkości. Zastosowanie napędu bezczujnikowego niesie za sobą wiele korzyści. Brak dodatkowych urządzeń pomiarowych, które mogą być podatne na awarie, zwiększa niezawodność oraz obniża koszty napędu.

Zmienne stanu w stanie ustalonym dobrze zaprojektowanego obserwatora powinny być odtwarzane z zerowymi błędami. W praktyce jakość odtwarzania obserwatora Luenbergera zależna jest od dokładności przyjętego modelu matematycznego maszyny. W szczególności błędy parametrów modelu, takie jak rezystancje czy indukcyjności, mogą negatywnie wpływać na jakość odtwarzania zmiennych.

W [1, 2, 3, 4] wykorzystano obserwator Luenbergera do odtwarzania strumienia wirnika maszyny indukcyjnej, pracujący w roli modelu przestrajanego estymatora MRAS oraz zaproponowano metody doboru wzmocnień obserwatora. W [5] zaproponowano natomiast obserwator prędkości wirnika oparty na rozszerzonym modelu maszyny indukcyjnej, którego odporność na błędy parametrów modelu maszyny jest przedmiotem badań przedstawionych w niniejszej pracy.

Równania rozszerzonego obserwatora prędkości

Rozszerzony obserwator prędkości oparty jest na rozszerzonym modelu maszyny indukcyjnej, w którym

wprowadzono nową zmienną ζ będącą iloczynem prędkości kątowej wirnika ω_r oraz wektora strumienia wirnika ψ_r :

$$(1) \quad \zeta = \omega_r \psi_r$$

Rozszerzony obserwator prędkości opisany jest następującym układem równań, otrzymanym przy założeniu małych zmian prędkości kątowej wirnika:

$$(2) \quad \frac{d\hat{i}_s}{d\tau} = a_1 \hat{i}_s + a_2 \hat{\psi}_r + ja_3 \hat{\zeta} + a_4 u_s +$$

$$k_{11} \tilde{\zeta} + jk_{12} \tilde{\zeta} + k_{13} \tilde{i}_s + jk_{14} \tilde{i}_s,$$

$$(3) \quad \frac{d\hat{\psi}_r}{d\tau} = a_5 \hat{i}_s + a_6 \hat{\psi}_r + j\hat{\zeta} +$$

$$k_{21} \tilde{\zeta} + jk_{22} \tilde{\zeta} + k_{23} \tilde{i}_s + jk_{24} \tilde{i}_s,$$

$$(4) \quad \frac{d\hat{\zeta}}{d\tau} = a_5 \hat{\omega}_r \hat{i}_s + a_6 \hat{\zeta} + j\hat{\omega}_r \hat{\zeta} +$$

$$k_{31} \tilde{\zeta} + jk_{32} \tilde{\zeta} + k_{33} \tilde{i}_s + jk_{34} \tilde{i}_s,$$

$$(5) \quad \hat{\omega}_r = \frac{\hat{\psi}_{r\alpha} \hat{\zeta}_\alpha + \hat{\psi}_{r\beta} \hat{\zeta}_\beta}{\hat{\psi}_r^2},$$

gdzie zmienne oznaczone symbolem $\hat{\cdot}$ są zmiennymi odtwarzanymi, zmienne oznaczone $\tilde{\cdot}$ są błędami odtwarzania, \hat{i}_s , $\hat{\psi}_r$, u_s są wektorami prądu stojana, strumienia wirnika oraz napięcia stojana, $\hat{\psi}_r$ jest modulem wektora strumienia wirnika, k_{11}, \dots, k_{34} są wzmocnieniami obserwatora, τ jest czasem względnym, ω_r jest prędkością kątową wirnika, natomiast a_1, \dots, a_6 są stałymi zależnymi od parametrów maszyny zdefiniowane następująco:

$$a_1 = -\frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{w L_r}, a_2 = \frac{R_r L_m}{w L_r}, a_3 = -\frac{L_m}{w}, a_4 = \frac{L_r}{w},$$

$$a_5 = \frac{R_r L_m}{L_r}, a_6 = -\frac{R_r}{L_r}, a_7 = \frac{L_m}{L_r}, w = L_s L_r - L_m^2$$

Błąd odtwarzania prądu stojana jest różnicą między wartością odtwarzaną a mierzoną (6), natomiast błąd zmiennej ζ zdefiniowany został zależnością (7):

$$(6) \quad \tilde{i}_s = \hat{i}_s - i_s,$$

$$(7) \quad \tilde{\zeta} = \hat{\zeta} - \hat{\omega}_r \hat{\psi}_r.$$

Dynamika błędów odtwarzania

Odejmując równania rozszerzonego modelu maszyny indukcyjnej od równań rozszerzonego obserwatora uzyskuje się następujący układ równań opisujących dynamikę błędów odtwarzania badanego obserwatora:

$$(8) \quad \frac{d\tilde{i}_s}{d\tau} = a_1 \tilde{i}_s + a_2 \tilde{\psi}_r + ja_3 (\hat{\zeta} - \omega_r \psi_r) +$$

$$k_{11} \tilde{\zeta} + jk_{12} \tilde{\zeta} + k_{13} \tilde{i}_s + jk_{14} \tilde{i}_s,$$

$$(9) \quad \frac{d\tilde{\psi}_r}{d\tau} = a_5 \tilde{i}_s + a_6 \tilde{\psi}_r + j(\hat{\zeta} - \omega_r \psi_r) +$$

$$k_{21} \tilde{\zeta} + jk_{22} \tilde{\zeta} + k_{23} \tilde{i}_s + jk_{24} \tilde{i}_s,$$

$$(10) \quad \frac{d\hat{\zeta}}{d\tau} = a_5 \hat{\omega}_r (i_s + \tilde{i}_s) + a_6 \hat{\zeta} + j\hat{\omega}_r \hat{\zeta} +$$

$$k_{31} \tilde{\zeta} + jk_{32} \tilde{\zeta} + k_{33} \tilde{i}_s + jk_{34} \tilde{i}_s.$$

Błąd odtwarzania oraz wartość odtwarzanej prędkości wirnika nie mogą być określone bez znajomości odtwarzanej wartości zmiennej $\hat{\zeta}$. Z tego względu jako trzecie równanie służące do analizy dynamiki błędów odtwarzania obserwatora zamiast równania dla błędu odtwarzania $\tilde{\zeta}$ przyjęto równanie odtwarzanej zmiennej $\hat{\zeta}$ [6]. Występującą w równaniach (8) – (10) odtwarzaną prędkości wirnika oraz błąd $\tilde{\zeta}$ określić można na podstawie zależności (11), (12):

$$(11) \quad \hat{\omega}_r = \frac{(\psi_{r\alpha} + \tilde{\psi}_{r\alpha}) \hat{\zeta}_\alpha + (\psi_{r\beta} + \tilde{\psi}_{r\beta}) \hat{\zeta}_\beta}{(\psi_{r\alpha} + \tilde{\psi}_{r\alpha})^2 + (\psi_{r\beta} + \tilde{\psi}_{r\beta})^2},$$

(13)

$$A = \begin{bmatrix} a_1 + k_{13} & -k_{14} + a_5 \frac{\bar{i}_{sq}}{\bar{\psi}_{rd}} + \bar{\omega}_r & a_2 & k_{12} \bar{\omega}_r & 0 & -a_3 - k_{12} \\ k_{14} - a_5 \frac{\bar{i}_{sq}}{\bar{\psi}_{rd}} - \bar{\omega}_r & a_1 + k_{13} & 0 & a_2 - k_{11} \bar{\omega}_r & a_3 & k_{11} \\ a_5 + k_{23} & -k_{24} & a_6 & a_5 \frac{\bar{i}_{sq}}{\bar{\psi}_{rd}} + \bar{\omega}_r + k_{22} \bar{\omega}_r & 0 & -1 - k_{22} \\ k_{24} & a_5 + k_{23} & -\left(a_5 \frac{\bar{i}_{sq}}{\bar{\psi}_{rd}} + \bar{\omega}_r \right) & a_6 - k_{21} \bar{\omega}_r & 1 & k_{21} \\ k_{33} + a_5 \bar{\omega}_r & -k_{34} & -\bar{\omega}_r a_5 \frac{\bar{i}_{sd}}{\bar{\psi}_{rd}} & k_{32} \bar{\omega}_r & a_6 + a_5 \frac{\bar{i}_{sd}}{\bar{\psi}_{rd}} & -k_{32} + a_5 \frac{\bar{i}_{sq}}{\bar{\psi}_{rd}} \\ k_{34} & k_{33} + a_5 \bar{\omega}_r & -\bar{\omega}_r a_5 \frac{\bar{i}_{sq}}{\bar{\psi}_{rd}} - \bar{\omega}_r^2 & -k_{31} \bar{\omega}_r & \bar{\omega}_r & a_6 + k_{31} \end{bmatrix}$$

Wpływ błędów parametrów na właściwości dynamiczne obserwatora

Właściwości dynamiczne obserwatora uzyskane na podstawie macierzy (13) szczegółowo opisane zostały w pracach [6-8].

Występujące w równaniach obserwatora współczynniki a_1, \dots, a_6 zależne są od parametrów modelu maszyny,

$$(12) \quad \tilde{\zeta} = \hat{\zeta} - \hat{\omega}_r \psi_r - \hat{\omega}_r \tilde{\psi}_r.$$

Równania (8) – (12) stanowią nieliniowy układ równań różniczkowych, zatem nie ma możliwości bezpośredniego określenia właściwości dynamicznych obserwatora na podstawie tych zależności. W celu uzyskania macierzy opisującej dynamikę błędów odtwarzania obserwatora powyższe równania zostały zlinearyzowane wokół punktu pracy zapewniającego zerowe błędy odtwarzania. W wyniku nieliniowości obserwatora w zlinearyzowanych równaniach obserwatora występują rzeczywiste wartości prędkości wirnika oraz wektorów strumienia wirnika i prądu stojana. W stanie ustalonym wektory rzeczywistego strumienia wirnika oraz prądu stojana wirują z pulsacją wirowania wektora napięcia stojana. Oznacza to, że ich składowe wyrażone w układzie współrzędnych nieruchomym względem stojana zmieniają się sinusoidalnie z częstotliwością uniemożliwiającą analizowanie położenia biegunów. Składowe wektorów wyrażone zostały zatem w układzie współrzędnych zorientowanym względem wektora strumienia wirnika. W stanie ustalonym maszyny składowe wektorów w tak określonym wirującym układzie są stałe. Ostatecznie uzyskano macierz A opisującą dynamikę błędów odtwarzania obserwatora postaci (13) [6]. Symbolem $\bar{\cdot}$ oznaczono wartości zmiennych w stanie ustalonym.

Wartości wzmocnień obserwatora zostały dobrane przy wykorzystaniu algorytmów ewolucyjnych. Zastosowana funkcja celu szczegółowo przedstawiona została w [7]. W [8] opisany został sposób modyfikacji wzmocnień obserwatora wraz ze zmianą kierunku obrotów wirnika, tak aby zachować takie same właściwości obserwatora dla obydwu kierunków pracy maszyny oraz przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych.

których wartości nie są dokładnie znane. W praktyce współczynniki te obarczone są zatem pewnymi błędami \tilde{a}_n :

$$(14) \quad \tilde{a}_n = \hat{a}_n - a_n,$$

gdzie $n = 1 \dots 6$, \hat{a}_n jest wartością współczynnika występującego w równaniach obserwatora uzyskana na drodze pomiaru parametrów maszyny, natomiast a_n jest rzeczywistą wartością współczynnika modelu maszyny.



Równania opisujące dynamikę błędów odtwarzania obserwatora w przypadku występowania błędów parametrów modelu maszyny przyjmują następującą postać [6]:

$$(15) \quad \frac{d\tilde{\mathbf{i}}_s}{d\tau} = \hat{a}_1\tilde{\mathbf{i}}_s + \hat{a}_2\tilde{\boldsymbol{\psi}}_r + j\hat{a}_3(\hat{\zeta} - \omega_r\boldsymbol{\psi}_r) + k_{11}\tilde{\zeta} + jk_{12}\tilde{\zeta} + k_{13}\tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{14}\tilde{\mathbf{i}}_s + \tilde{a}_1\tilde{\mathbf{i}}_s + \tilde{a}_2\boldsymbol{\psi}_r + j\tilde{a}_3\omega_r\boldsymbol{\psi}_r + \tilde{a}_4\mathbf{u}_s,$$

$$(16) \quad \frac{d\tilde{\boldsymbol{\psi}}_r}{d\tau} = \hat{a}_5\tilde{\mathbf{i}}_s + \hat{a}_6\tilde{\boldsymbol{\psi}}_r + j(\hat{\zeta} - \omega_r\boldsymbol{\psi}_r) + k_{21}\tilde{\zeta} + jk_{22}\tilde{\zeta} + k_{23}\tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{24}\tilde{\mathbf{i}}_s + \tilde{a}_5\tilde{\mathbf{i}}_s + \tilde{a}_6\boldsymbol{\psi}_r,$$

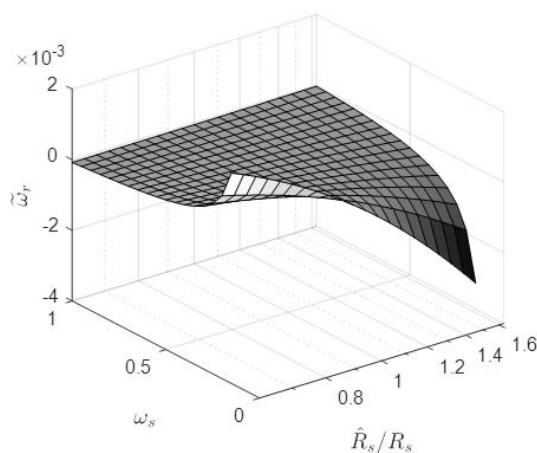
$$(17) \quad \frac{d\hat{\zeta}}{d\tau} = \hat{a}_5\hat{\omega}_r(\mathbf{i}_s + \tilde{\mathbf{i}}_s) + (\hat{a}_6 + j\hat{\omega}_r)\hat{\zeta} + k_{31}\tilde{\zeta} + jk_{32}\tilde{\zeta} + k_{33}\tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{34}\tilde{\mathbf{i}}_s.$$

W wyniku linearyzacji powyższego układu równań uzyskuje się macierz opisującą dynamikę obserwatora postaci (13) z tą różnicą, że występujące w elementach macierzy współczynniki a_1, \dots, a_6 zastąpione są współczynnikami obarczonymi błędami $\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_6$. Oznacza to, że wartości własne tej macierzy zależne są od wartości współczynników występujących w równaniach obserwatora, a nie od rzeczywistych parametrów maszyny. Właściwości dynamiczne obserwatora, czyli także stabilność punktu pracy, nie są zatem zależne od wartości błędów parametrów modelu. Powyższe wnioski wyciągnięto na podstawie wyników uzyskanych z linearyzacji równań (15) – (17) wokół punktu pracy zapewniającego zerowe błędy odtwarzania. W kolejnym rozdziale wykazano, że w przypadku występowania odchyłek parametrów modelu maszyny ustalone błędy odtwarzania mogą nieznacznie odbiegać od zera, co wpływa na zmianę punktu pracy obserwatora. Linearyzacja wokół nowego punktu pracy daje w dalszym ciągu zbliżone rozkłady biegunów do tych uzyskanych w przypadku linearyzacji wokół zerowych błędów odtwarzania. Ze względu na złożoność zależności opisujących dynamikę obserwatora w przypadku przyjęcia niezerowego punktu pracy podczas linearyzacji oraz niewielki wpływ uproszczenia polegającego na linearyzacji wokół zerowego punktu pracy w artykule analizowany jest uproszczony przypadek.

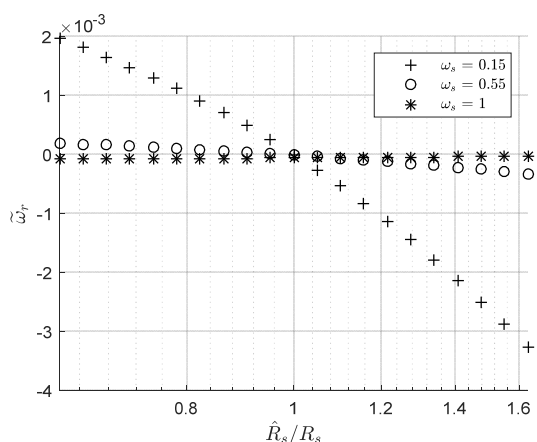
Wpływ błędów parametrów na właściwości statyczne obserwatora

W równaniach (15) oraz (16) opisujących dynamikę błędów odtwarzania rozszerzonego obserwatora prędkości w przypadku występowania błędnie zidentyfikowanych parametrów modelu maszyny występują wyrazy zawierające iloczyny błędów współczynników \tilde{a}_n oraz wektorów rzeczywistych zmiennych maszyny. Punkt pracy, w którym błędy odtwarzania są równe zero nie zawsze jest wówczas punktem równowagi (po prawych stronach równań różniczkowych uzyskuje się wartości różne od zera). Oznacza to, że odtwarzane zmienne stabilizować się mogą wokół wartości obarczonych pewnymi błędami, a zatem w stanie ustalonym mogą występować błędy odtwarzania.

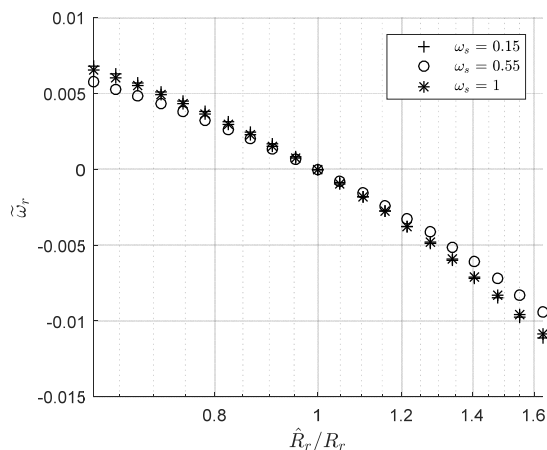
Ze względu na złożoność układu równań (15) – (17) wyznaczenie analitycznych zależności opisujących wartość błędu odtwarzania w stanie ustalonym przy występowaniu błędów parametrów jest praktycznie niemożliwe. Błędy statyczne uzyskane zostały zatem na podstawie badań symulacyjnych. Badania przeprowadzono przy stałym momencie obciążenia wynoszącym $m_o = 0,4$ dla różnych prędkości wirnika.



Rys. 1. Błędy odtwarzania prędkości wirnika w funkcji błędu rezystancji stojana maszyny obciążonej momentem $m_o = 0,4$



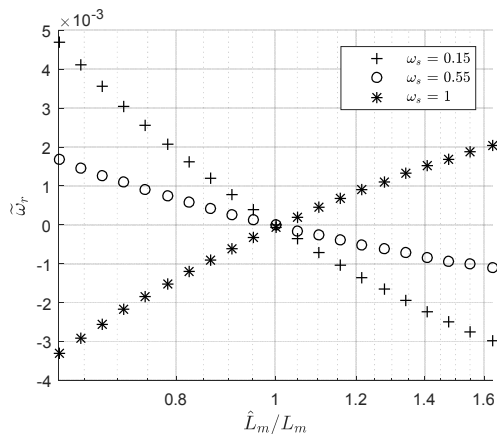
Rys. 2. Błędy odtwarzania prędkości wirnika w funkcji błędu rezystancji stojana maszyny obciążonej momentem $m_o = 0,4$



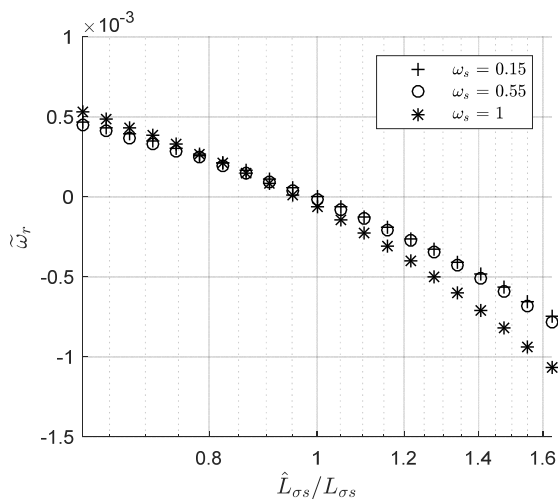
Rys. 3. Błędy odtwarzania prędkości wirnika w funkcji błędu rezystancji wirnika maszyny obciążonej momentem $m_o = 0,4$

Wyniki badań dla błędów rezystancji stojana przedstawiono na rysunku 1. Jak wynika z rysunku, wpływ błędów parametrów modelu zależny jest również od prędkości kątowej wirnika. W przypadku występowania błędów rezystancji stojana oddziaływanie tych błędów rośnie wraz ze spadkiem prędkości wirnika. W celu poprawy czytelności rysunków wpływ błędów parametrów modelu przedstawiono na dwuwymiarowych wykresach, na których zamieszczone są charakterystyki dla trzech wartości prędkości. Wyniki badań symulacyjnych wpływu

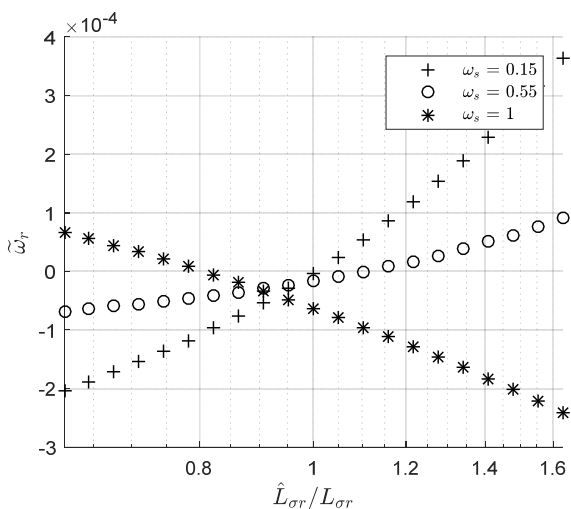
błędów rezystancji stojana, rezystancji wirnika, a także indukcyjności magnesującej oraz indukcyjności rozproszenia stojana i wirnika przedstawione zostały na rysunkach 1 – 5.



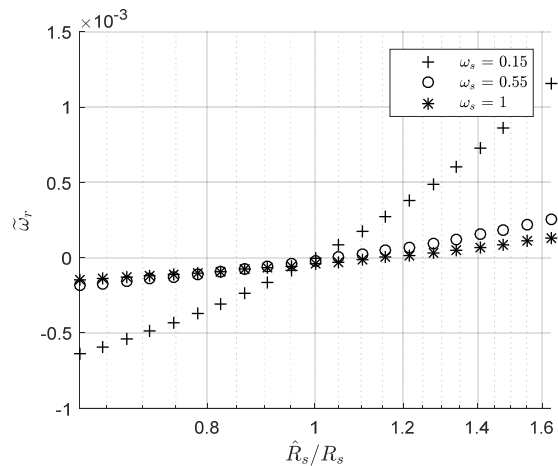
Rys. 4. Błędy odtwarzania prędkości wirnika w funkcji błędu indukcyjności wzajemnej maszyny obciążonej momentem $m_o = 0,4$



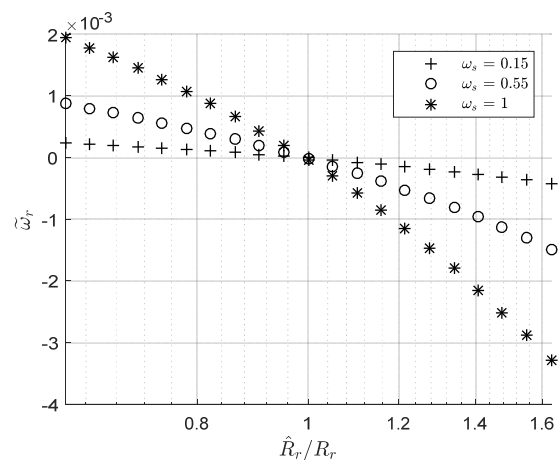
Rys. 5. Błędy odtwarzania prędkości wirnika w funkcji błędu indukcyjności rozproszenia stojana dla maszyny obciążonej momentem $m_o = 0,4$



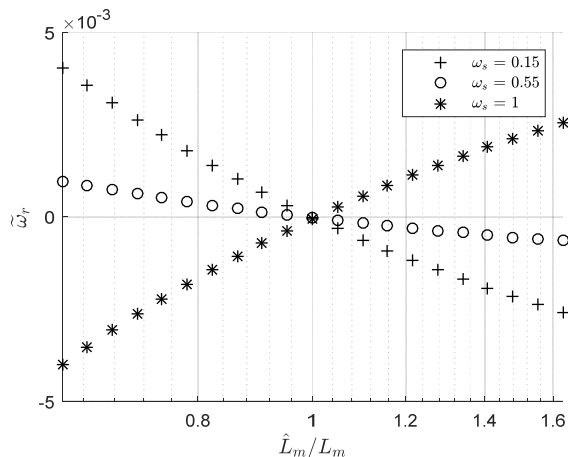
Rys. 6. Błędy odtwarzania prędkości wirnika w funkcji błędu indukcyjności rozproszenia wirnika dla maszyny obciążonej momentem $m_o = 0,4$



Rys. 7. Błędy odtwarzania prędkości wirnika w funkcji błędu rezystancji stojana maszyny nieobciążonej

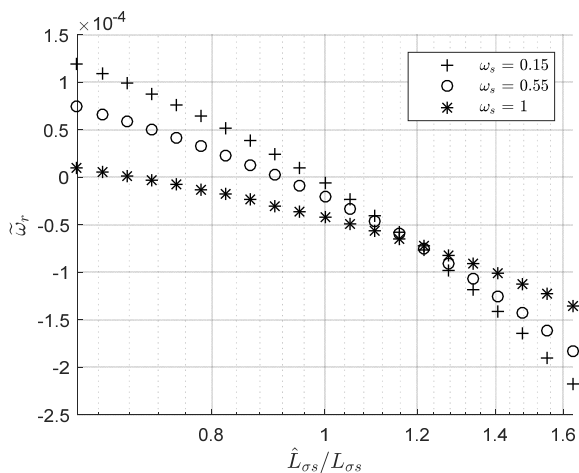


Rys. 8. Błędy odtwarzania prędkości wirnika w funkcji błędu rezystancji wirnika maszyny nieobciążonej

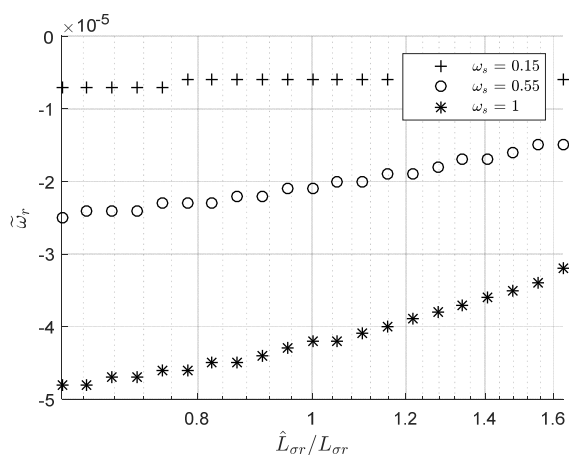


Rys. 9. Błędy odtwarzania prędkości wirnika w funkcji błędu indukcyjności głównej maszyny nieobciążonej

Błędy odtwarzania prędkości wirnika zależne są nie tylko od wartości błędów parametrów modelu, ale także od prędkości kątowej wirnika maszyny. Wpływ prędkości wirnika jest szczególnie zauważalny w przypadku występowania błędów rezystancji stojana oraz indukcyjności magnesującej. W przypadku występowania błędów rezystancji wirnika prędkość wirnika praktycznie nie ma wpływu na jakość odtwarzania prędkości maszyny.



Rys. 10. Błędy odtwarzania prędkości wirnika w funkcji błędu indukcyjności rozproszenia stojana dla maszyny nieobciążonej



Rys. 11. Błędy odtwarzania prędkości wirnika w funkcji błędu indukcyjności rozproszenia wirnika dla maszyny nieobciążonej

Największy błąd odtwarzania prędkości w badanym zakresie błędów parametrów (od wartości parametrów mniejszych 1,6 razy do większych 1,6 razy od wartości rzeczywistych) występuje w przypadku błędu rezystancji wirnika i wynosi około 1% prędkości znamionowej. Występowanie błędów indukcyjności rozproszenia stojana oraz wirnika ma znacznie mniejszy wpływ na jakość działania obserwatora. W badanych zakresach błędów parametrów błąd odtwarzania prędkości wirnika przy występowaniu błędu indukcyjności rozproszenia stojana praktycznie nie przekracza 0,1%.

W celu zbadania wpływu momentu obciążenia na jakość działania obserwatora przy występowaniu błędów parametrów modelu badania wykonano dla maszyny nieobciążonej. Wyniki uzyskane dla maszyny nieobciążonej przedstawiono na rysunkach 7 – 11.

Wpływ momentu obciążenia na oddziaływanie błędów parametrów modelu jest szczególnie zauważalny w przypadku występowania błędów rezystancji stojana oraz wirnika. W przypadku występowania błędów rezystancji wirnika błędy odtwarzania prędkości w stanie ustalonym są nawet trzykrotnie mniejsze dla maszyny nieobciążonej niż dla maszyny obciążonej momentem $m_o = 0,4$. Zmiana

momentu ma natomiast znikomy wpływ na błędy ustalone obserwatora w przypadku występowania błędu indukcyjności magnesującej. Wpływ błędów indukcyjności rozproszenia stojana oraz wirnika pozostaje w dalszym ciągu znikomy.

Wnioski

Dokładność odtwarzania obserwatora zależna jest w dużym stopniu od dokładności modelu obiektu. Występowanie błędów parametrów modelu prowadzi do występowania błędów odtwarzania. W przypadku rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej pokazano, że występowanie błędów parametrów modelu nie ma wpływu na właściwości dynamiczne obserwatora. Oznacza to, że wzmocnienia dobrane symulacyjnie dla pewnych wartości współczynników będą zapewniać stabilność obserwatora, nawet jeśli są one obciążone błędami. Występowanie błędów parametrów skutkuje natomiast błędami odtwarzania w stanie ustalonym. W badanym w pracy zakresie błędów parametrów maksymalny błąd odtwarzania wynosi 1% prędkości znamionowej. Wynik ten uzyskano dla stosunkowo dużego błędu rezystancji wirnika wynoszącego 60%.

Z przeprowadzonych badań wynika, że rozszerzony obserwator prędkości można stosować w rzeczywistych napędach, dla których wartości parametrów nie są dokładnie znane.

Autorzy: dr inż. Daniel Wachowiak, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: daniel.wachowiak@pg.gda.pl; prof. dr hab. inż. Zbigniew Krzemiński, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: zbigniew.krzeminski@pg.gda.pl.

LITERATURA

- [1] Niestrój R., Białoń T., Estymator typu mras z proporcjonalnym obserwatorem luenbergera do odtwarzania zmiennych stanu silnika indukcyjnego. *Pr. Nauk. Inst. Masz. Napędów i Pomiarów Elektr. Politech. Wrocławskiej*, nr 62 (2008), 372-377.
- [2] Białoń T., Lewicki A., Niestrój R., Pasko M.: Porównanie dwóch metod doboru parametrów proporcjonalnego obserwatora zmiennych stanu silnika indukcyjnego pracującego w roli modelu przestrajanego estymatora typu MRAS. *Przegląd Elektrotechniczny*. (2012), Nr 4b.
- [3] Kubota H., Matsuse K., Nakano T.: New adaptive flux observer of induction motor for wide speed rangemotor drives. *IECON '90 16th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, 1990, 921-926.
- [4] Kubota H., Matsuse K., Nakano T.: DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Machine. *IEEE Trans. On Ind. Appl.*, 2 (29), 1993, 344-348.
- [5] Krzemiński Z.: Observer of induction motor speed based on exact disturbance model. *Int. Conf. EPE-PEMC'2008*, Poznan, Poland, 2008.
- [6] Wachowiak D., Analiza właściwości rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej, rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2016
- [7] Krzemiński Z., Wachowiak D., Dobór wzmocnień rozszerzonego obserwatora prędkości na podstawie rozkładu biegunów, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 11, 163-168
- [8] Krzemiński Z., Wachowiak D., Analiza działania rozszerzonego obserwatora prędkości w szerokim zakresie zmian prędkości maszyny indukcyjnej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 6, 91-96