

Jarosław Rolek*, Grzegorz Utrata**, Andrzej Kapłon*

*Politechnika Świętokrzyska, Kielce

**Politechnika Częstochowska, Częstochowa

ESTYMACJA PRĘDKOŚCI Z WYKORZYSTANIEM CHARAKTERYSTYKI CZĘSTOTLIWOŚCIOWEJ SILNIKA INDUKCYJNEGO W WARUNKACH ODKSZTAŁCONEGO NAPIĘCIA ZASILAJĄCEGO

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę wpływu odkształceń napięć zasilających rozpatrywany silnik indukcyjny na poprawność procesu estymacji prędkości kątovej, którego algorytm działania oparty jest o znajomość charakterystyki częstotliwościowej indukcyjności tego silnika. Charakterystyka ta stanowi odwzorowanie pewnego rodzaju transmitancji widmowej silnika, z tego względu, analiza pracy maszyny, realizowana przy wykorzystaniu modelu matematycznego bazującego na tej charakterystyce, może zostać przeprowadzona przy zmiennych parametrach wymuszenia napięciowego, a także przy szybkozmiennych stanach elektromechanicznych. Prezentowane eksperymenty wskazują również na fakt jednoznacznego odwzorowywania zmienności parametrów elektromagnetycznych wirnika, wynikającej ze zjawiska wypierania prądu w jego przewodzących litych elementach, przez charakterystykę częstotliwościową indukcyjności maszyny przy dowolnych częstotliwościach napięć zasilających. Przeprowadzona analiza ma na celu oszacowanie możliwości wykorzystania proponowanego algorytmu estymacji prędkości kątovej silnika indukcyjnego w układach częstotliwościowej regulacji prędkości tego typu maszyn. Badaniom został poddany silnik indukcyjny z wirnikiem wykonanym z litego materiału magnetycznego, tj. maszyna z silnie zaznaczonym zjawiskiem wypierania prądów.

Abstract: The analysis of an impact of higher harmonics in induction motor supply voltages on the correctness of an angular speed estimation process, which operation algorithm is based on the knowledge of a motor inductance frequency characteristic is presented in the paper. The characteristic can be considered as motor spectral transmittance of some kind, therefore a machine operation analysis, realized with the use of a mathematical model based on that characteristic, can be carried out at varied supply voltage parameters as well as at fast-changing electromechanical transients. The presented experiments also indicate the fact of an unequivocal representation of rotor electromagnetic parameters variability, resulting from the skin effect in rotor solid conductive elements, by the machine inductance frequency characteristic at any frequency of supply voltages. The conducted analysis aims at evaluating the possibility of using the proposed induction motor speed estimation algorithm in variable-frequency speed control systems. The study has been subjected to an induction motor with a solid rotor manufactured from the magnetic material, i.e. a machine characterized by a significant skin effect occurring in rotor solid conductive elements.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, charakterystyki częstotliwościowe, estymacja prędkości

Keywords: induction motor, frequency characteristics, speed estimation

1. Wstęp

Zmienność parametrów elektromagnetycznych wirnika silnika indukcyjnego (SI), wynikająca ze zjawiska wypierania prądów w litych elementach tego wirnika jest odwzorowywana przez charakterystykę częstotliwościową indukcyjności maszyny indukcyjnej [1]. Jak pokazano w szeregu prac [1÷6] charakterystyka ta może być dobrze odwzorowana, przez wieloobwodowy po stronie wtórnej schemat zastępczy (WSZ) o stałych parametrach skupionych. W [6] zaprezentowano sposób wyznaczania skupionych parametrów elektromagnetycznych tego typu schematu zastępczego przydatnego w analizie stanów elektrodynamicznych maszyn

indukcyjnych z litą stroną wtórną. Model maszyny został zbudowany ponadto z uwzględnieniem wyższych harmonicznych przestrzennych rozkładu pola elektromagnetycznego. Częstotliwościowa charakterystyka indukcyjności SI może być rozpatrywana jako odwzorowanie pewnego rodzaju transmitancji widmowej SI. Z tego względu, analiza pracy takiej maszyny, realizowana przy wykorzystaniu modelu matematycznego bazującego na tej charakterystyce, może zostać przeprowadzona przy zmiennych parametrach wymuszenia napięciowego, a także przy szybkozmiennych stanach elektromechanicznych.

Model maszyny przedstawiony w [6] może być zatem przydatny w analizie stanów elektrody-

namicznych maszyn indukcyjnych przy zasilaniu napięciem odkształconym, np. z falownika napięcia. Modulacja szerokości impulsów wykorzystywana w układach napędowych z częstotliwościową regulacją prędkości kątowej powoduje, że przebiegi napięć wyjściowych przekształtnika charakteryzują się różnym od zera współczynnikiem odkształcenia THD_U :

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U^{(n)^2}}}{U^{(1)}} 100\% \quad (1)$$

gdzie: n – rząd harmonicznej, $U^{(n)}$ – skuteczna wartość n -tej harmonicznej napięcia, $U^{(1)}$ – skuteczna wartość harmonicznej podstawowej napięcia.

Biorąc powyższe pod uwagę, celowe jest wykorzystanie częstotliwościowej charakterystyki indukcyjności SI względnie WSZ w algorytmach odtwarzających wielkości elektromechaniczne tego silnika [2], [3] - np. prędkość kątową, moment elektromagnetyczny - stanowiących nieodzowny element metod sterowania bezczujnikowymi układami napędowymi z silnikami prądu przemiennego [7÷9].

W pracy przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe indukcyjności SI, wyznaczone na podstawie odkształconych przebiegów wielkości elektrycznych, zarejestrowanych przy ściśle zdefiniowanych przebiegach napięć zasilających, na tle charakterystyk otrzymanych w oparciu o filtrowane przebiegi tych wielkości. Jak zostanie przedstawione w artykule, częstotliwościowa charakterystyka indukcyjności SI wyznaczona na podstawie filtrowanych przebiegów wielkości elektrycznych może stanowić charakterystykę wzorcową wykorzystywaną w metodach odtwarzania wybranych zmiennych stanu SI zaproponowanych w [2], [3]. Charakterystyka ta może również zostać użyta w procesie estymacji parametrów elektromagnetycznych WSZ maszyny indukcyjnej [1], [4].

Przeprowadzone badania eksperymentalne mają na celu oszacowanie wpływu wyższych harmonicznych w napięciach zasilających SI na kształt charakterystyki częstotliwościowej indukcyjności tego silnika, na bazie której został oparty algorytm estymacji prędkości kątowej SI, jak również określenie, czy proces filtracji odkształconych przebiegów elektrycznych pozwala zachować informację zapewniającą poprawność procesu estymacji tej prędkości.

2. Częstotliwościowa charakterystyka indukcyjności SI

Częstotliwościowa charakterystyka indukcyjności SI może zostać wyznaczona w wyniku rozwiązania zagadnienia polowego metodami analitycznymi [5] lub numerycznymi [6] jak również na drodze pomiarowej [1], [10].

W przypadku pomiarów stosuje się zwykle jedną z dwóch metod wyznaczania charakterystyki częstotliwościowej indukcyjności maszyny indukcyjnej. W pierwszej metodzie, przy zmianach w możliwie szerokim zakresie częstotliwości napięć zasilających, przeprowadzany jest pomiar wartości chwilowych napięć i prądów uzwojeń stojana przy zatrzymanym wirniku, natomiast w drugiej, przy stałej częstotliwości napięć zasilających oraz przy zmianach prędkości kątowej maszyny w możliwie szerokim przedziale zmian poślizgu, wymagany jest dodatkowo pomiar wartości chwilowych prędkości kątowej maszyny. Możliwe jest również jednoczesne, wzajemnie uzupełniające się wykorzystanie obu metod pomiarowych.

Zarejestrowane przebiegi napięć i prądów po transformacji do dwuosiowych wektorów przestrzennych odpowiednio napięcia $\underline{U}_1(\omega_1)$ i prądu stojana $\underline{I}_1(\omega_1, s)$ (wyrażonych w układzie współrzędnych wirującym z arbitralnie przyjętą prędkością ω_x) służą do wyznaczenia częstotliwościowej charakterystyki impedancji SI $\underline{Z}_1(\omega_1, s)$. Impedancja $\underline{Z}_1(\omega_1, s)$ może zostać przedstawiona jako szeregowe połączenie rezystancji uzwojenia fazowego stojana R_1 oraz reaktancji indukcyjnej SI $j\omega_1 \underline{L}_1(\omega_1, s)$:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1(\omega_1, s) &= \frac{\underline{U}_1(\omega_1)}{\underline{I}_1(\omega_1, s)} = R_1 + j\omega_1 \underline{L}_1(\omega_1, s) = \\ &= R_1 + j\omega_1 (L_{1\sigma} + \underline{L}_{1s}(\omega_1, s)) \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie: ω_1 – pulsacja napięć zasilających uzwojenia stojana, $\omega_1 = 2\pi f_1$, s – poślizg, $L_{1\sigma}$ – indukcyjność rozproszenia żłobkowego i czoł uzwojenia fazowego stojana, $\underline{L}_{1s}(\omega_1, s)$ – indukcyjność związana ze strumieniem magnetycznym w szczelinie powietrznej maszyny, j – jednostka urojona, $j^2 = -1$.

Występującą w wyrażeniu (2) reaktancję $j\omega_1 \underline{L}_{1s}(\omega_1, s)$ można przedstawić jako równoległe połączenie reaktancji magnesującej $j\omega_1 L_m$ oraz impedancji wirnika $\underline{Z}_2^*(\omega_2)$ maszyny [1], [4]:

$$\frac{1}{j\omega_1 \underline{L}_{1\delta}(\omega_1, s)} = \frac{1}{j\omega_1 \underline{L}_\mu} + \frac{1}{j\omega_1 \left[\underline{Z}_2^*(\omega_2) \right]} = \frac{1}{j\omega_1 \left[\underline{L}_\mu + \underline{Z}_2^*(\omega_2) \right]} \quad (3)$$

gdzie: ω_2, f_2 – pulsacja i częstotliwość prądów wirnika, $\omega_2 = 2\pi f_2$ oraz $\omega_2 = \omega_1 s$.

W punkcie pracy synchronicznej maszyny (tj. dla $\omega_2 = 0$) otrzymuje się $j\omega_1 \underline{L}_{1\delta}(\omega_1, s=0) = j\omega_1 \underline{L}_\mu$. Przy założeniu dotyczącym stałości strumienia magnetycznego, a w konsekwencji stałości parametrów obwodu magnetycznego maszyny, indukcyjność magnesująca \underline{L}_μ ma wartość stałą niezależną od pulsacji ω_1 napięć zasilających uzwojenia stojana tej maszyny.

W związku z powyższym, biorąc pod uwagę (3), równanie (2) można przedstawić w postaci:

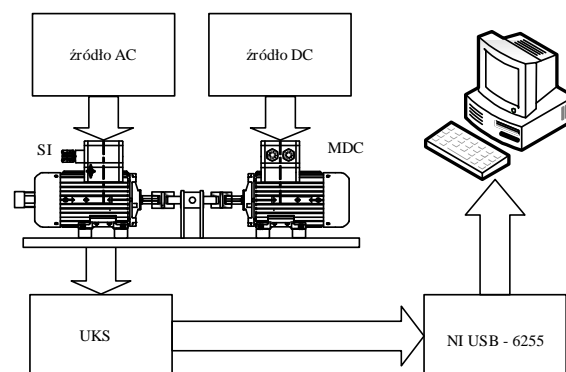
$$\begin{aligned} \frac{\underline{Z}_1(\omega_1, s) - R_1}{j\omega_1} &= \underline{L}_1(\omega_1, s) = \underline{L}_{1\sigma} + \underline{L}_{1\delta}(\omega_1, s) = \\ &= \underline{L}_{1\sigma} + \left[\frac{1}{\underline{L}_\mu} + \frac{j\omega_2}{\underline{Z}_2^*(\omega_2)} \right]^{-1} = \\ &= \underline{L}_{1\sigma} + \underline{L}_{1\delta}(\omega_2) = \underline{L}_1(\omega_2) \end{aligned} \quad (4)$$

Równanie (4) stanowi algorytm postępowania przy pomiarowym wyznaczaniu charakterystyki częstotliwościowej indukcyjności SI $\underline{L}_1(\omega_2)$.

3. Wybrane rezultaty badań eksperymentalnych

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym, którego schemat przedstawiono na rysunku 1. Analizie został poddany SI typu Sg 132S-4 z wirnikiem wykonanym z litego materiału magnetycznego S235JR. Badany SI, zasilany z programowalnego źródła AC (Ametek iX 9003 Series II), sprzęgnięty jest w sposób sztywny z maszyną prądu stałego (MDC) zasilaną z czterokwadratowego przekształtnika tyrystorowego (Parker DC590 plus). Przebiegi prądów zasilających rozpatrywany silnik przekształcane są na sygnały napięciowe za pomocą bezindukcyjnych przetworników rezystancyjnych zapewniających właściwy poziom sygnałów dla karty pomiarowej USB-6255. Podobnie przebiegi napięć zasilających analizowany silnik skalowane są z wykorzystaniem dzielników rezystancyjnych zbudowanych z rezystorów bezindukcyjnych, tak aby wartości były akceptowalne przez

układy wejściowe karty pomiarowej. Ze względu na szeroki zakres zmian prędkości kątownej badanej maszyny pomiar tej prędkości zrealizowany jest z wykorzystaniem resolvera.



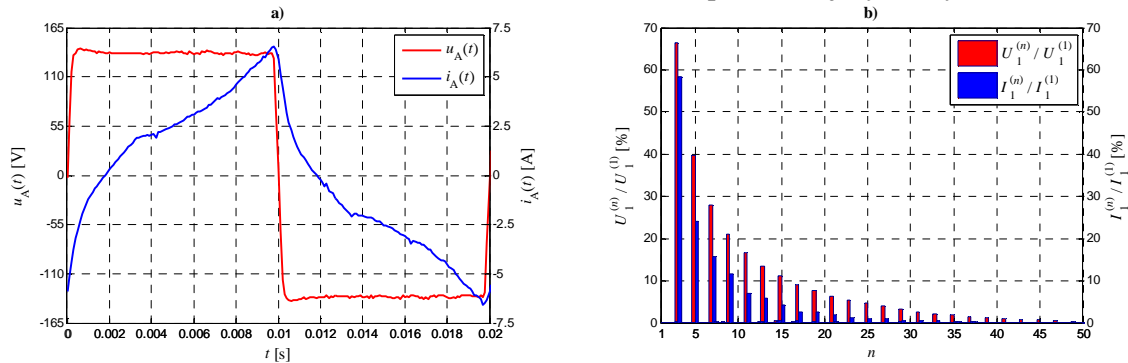
Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego

W trakcie eksperymentu przeprowadzone zostały pomiary wartości chwilowych napięć i prądów uzwojeń stojana oraz prędkości kątownej maszyny w przedziale zmian poślizgu $s = (-0.1 \div 1)$ dla wybranych częstotliwości napięć zasilających. Zachowano przy tym stały stosunek wartości skutecznej harmonicznej podstawowej $U_1^{(1)}$ napięć zasilających uzwojenia stojana względem częstotliwości f_1 tych napięć, zapewniając w przybliżeniu stałość strumienia magnetycznego w maszynie indukcyjnej. Ponadto, na potrzeby analizy prezentowanej w artykule, pomiary wielkości elektromechanicznych badanego SI zostały przeprowadzone przy obniżonym napięciu zasilającym w stosunku do znamionowego. Miało to na celu zachowanie punktu pracy silnika na liniowej części charakterystyki magnesowania.

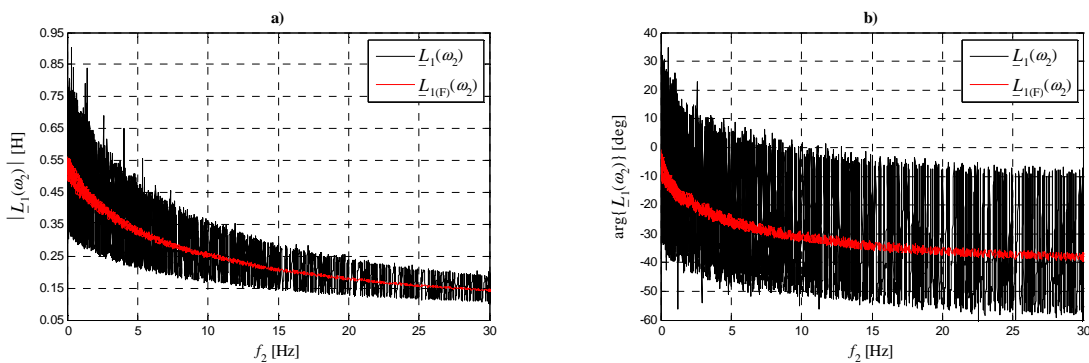
Korzystając z dedykowanego oprogramowania źródła napięcia AC zdefiniowano kształt napięć zasilających badany SI. W prezentowanej analizie wymuszenie stanowiło napięcie o przebiegu prostokątnym, jako zawierające pełne spektrum wyższych harmonicznych czasowych. Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi napięcia i prądu wybranej fazy uzwojenia stojana badanego silnika oraz ich widma amplitudowe. Następnie, zgodnie z opisaną procedurą, wyznaczone zostały częstotliwościowe charakterystyki indukcyjności $\underline{L}_1(\omega_2)$ badanego SI dla trzech wybranych częstotliwości zasilania (Rys. 3-5). Użycie charakterystyki $\underline{L}_1(\omega_2)$ w prezentowanej postaci (Rys. 3-5) w rozpatrywanym procesie estymacji prędkości kątownej SI jest problematyczne. Charakterystykę częstotliwościową indukcyjności $\underline{L}_{1(F)}(\omega_2)$ silnika,

która może być wykorzystana jako charakterystyka wzorcowa w procesie estymacji tej prędkości uzyskuje się poprzez filtrację przebiegów fazorów napięć i prądów uzwojeń stojana. Tak otrzymana charakterystyka jednoznacznie od-

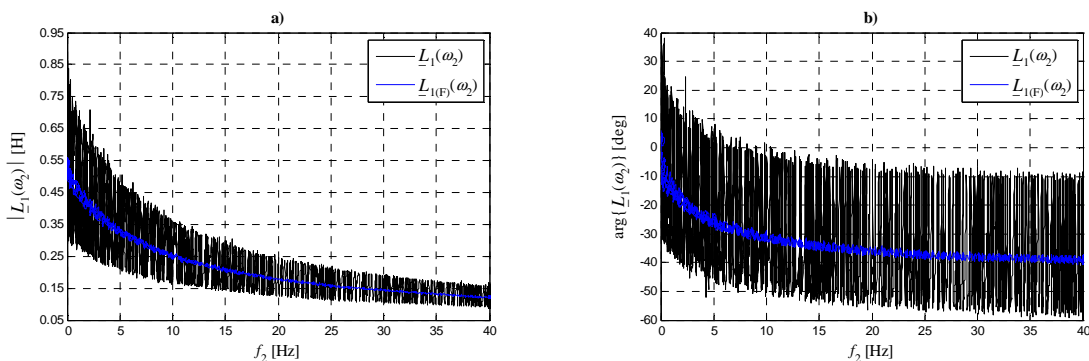
wzorowuje zmienność parametrów elektromagnetycznych wirnika w rozpatrywanym zakresie pracy SI, wynikającą ze zjawiska wypierania prądów w przewodzących litych elementach tego wirnika, przy dowolnych częstotliwościach napięć zasilających (Rys. 6).



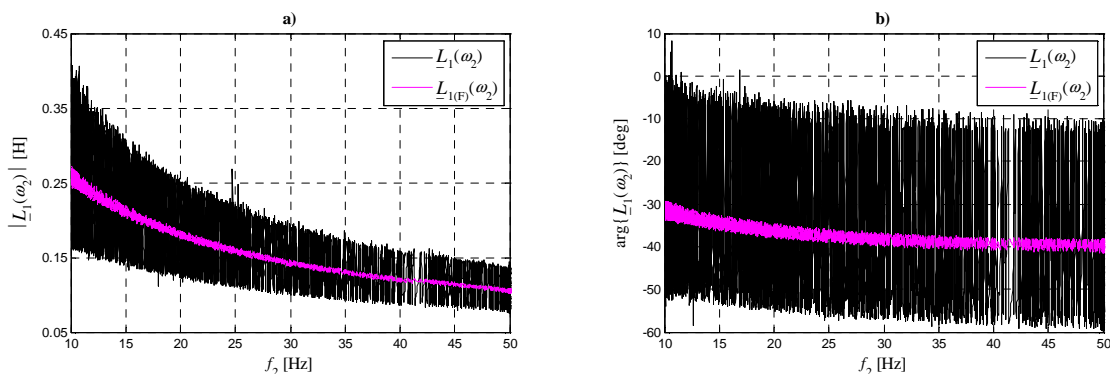
Rys. 2. Przebiegi napięcia i prądu fazy A uzwojenia stojana badanego SI przy częstotliwości napięć zasilających $f_1=50$ Hz (a) oraz widma amplitudowe tych przebiegów (b), $U_1^{(1)}$, $I_1^{(1)}$ - skuteczna wartość harmonicznej podstawowej odpowiednio napięcia i prądu stojana, $U_1^{(n)}$, $I_1^{(n)}$ - skuteczna wartość n -tej harmonicznej odpowiednio napięcia i prądu stojana



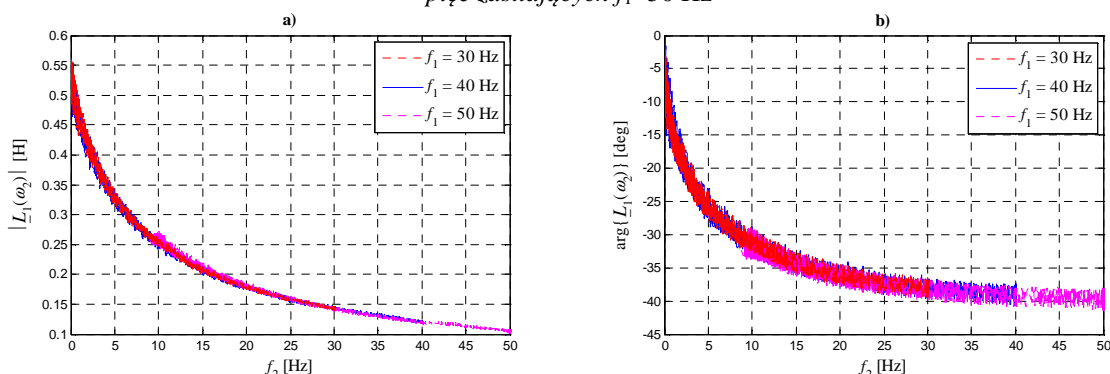
Rys. 3. Charakterystyki częstotliwościowe modułu (a) i argumentu (b) indukcyjności badanego SI wyznaczone na podstawie przebiegów wielkości elektromechanicznych zarejestrowanych przy częstotliwości napięć zasilających $f_1=30$ Hz



Rys. 4. Charakterystyki częstotliwościowe modułu (a) i argumentu (b) indukcyjności badanego SI wyznaczone na podstawie przebiegów wielkości elektromechanicznych zarejestrowanych przy częstotliwości napięć zasilających $f_1=40$ Hz



Rys. 5. Charakterystyki częstotliwościowe modułu (a) i argumentu (b) indukcyjności badanego SI wyznaczone na podstawie przebiegów wielkości elektromechanicznych zarejestrowanych przy częstotliwości napięć zasilających $f_1=50$ Hz



Rys. 6. Charakterystyki częstotliwościowe modułu (a) i argumentu (b) indukcyjności $\underline{L}_{1(F)}(\omega_2)$ badanego SI wyznaczone na podstawie filtrowanych przebiegów fazy prądów i napięć stojana

Proponowany przez autorów algorytm estymacji prędkości kątowej SI polega na wyznaczeniu wartości chwilowych indukcyjności silnika $\underline{L}_{1(F)}(\omega_2, t)$, które następnie są porównywane ze wzorcową charakterystyką częstotliwościową indukcyjności $\underline{L}_{1(F)}(\omega_2)$ tego silnika w celu wyznaczenia częstotliwości f_2 prądów indukowanych w elementach przewodzących wirnika. Wartości chwilowe indukcyjności $\underline{L}_{1(F)}(\omega_2, t)$ obliczane są zgodnie z równaniem (4) przy wykorzystaniu przebiegów wielkości elektrycznych uzyskanych w wyniku filtracji przebiegów odkształconych.

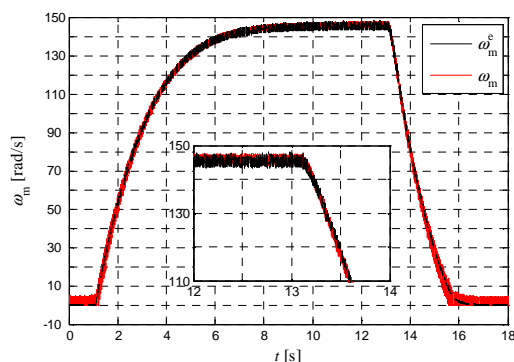
Z kolei, bazując na znajomości częstotliwości f_1 napięć zasilających uzwojenia stojana oraz wyznaczonych częstotliwości f_2 prądów wirnika estymowana jest prędkość kątowa SI zgodnie z następującym równaniem:

$$\omega_m^e = \frac{2\pi}{p_p} (f_1 - f_2) \quad (5)$$

gdzie: p_b – liczba par biegunów.

W celu weryfikacji dokładności odwzorowywania prędkości kątowej SI poprzez prędkość

estymowaną na podstawie prezentowanego algorytmu, dokonano rejestracji przebiegów prędkości kątowej maszyny oraz prądów i napięć zasilających uzwojenia stojana przy zadanych warunkach obciążenia SI.



Rys. 7. Przebiegi prędkości kątowych: zmierzonej ω_m oraz estymowanej ω_m^e przy rozruchu i skokowej zmianie momentu obciążenia

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi prędkości kątowych: zmierzonej ω_m oraz estymowanej ω_m^e przy następujących parametrach napięć zasilających rozpatrywany SI: $U_1^{(1)}=120$ V, $f_1=50$ Hz, współczynnik wypełnienia 50%

(Rys. 2). Obserwuje się dobrą zgodność przebiegów prędkości zmierzonej badanego SI i odtworzonej na podstawie częstotliwościowej charakterystyki indukcyjności $\underline{L}_{1(F)}(\omega_2)$ w szerokim zakresie zmian poślizgu tego silnika.

4. Wnioski

Częstotliwościowa charakterystyka indukcyjności maszyny indukcyjnej jednoznacznie odwzorowuje zmienność parametrów elektromagnetycznych wirnika w rozpatrywanym zakresie pracy tej maszyny, wynikającą ze zjawiska wypierania prądów w przewodzących litych elementach tego wirnika, przy dowolnych częstotliwościach napięć zasilających. Fakt ten implikuje możliwości wykorzystania tej charakterystyki w układach odtwarzających elektromechaniczne zmienne stanu SI.

Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwalają na stwierdzenie, że proces filtracji odkształconych przebiegów elektrycznych zachowuje informację w trajektorii indukcyjności SI zapewniającą poprawność procesu estymacji prędkości kątowej SI, co daje możliwość wykorzystania takiego rozwiązania w układach częstotliwościowej regulacji prędkości kątowej silników indukcyjnych. W badaniach analizowano przypadek prostokątnego co do kształtu napięcia zasilającego.

5. Literatura

- [1]. G. Utrata, J. Rolek, A. Kapłon "Eksperymentalna identyfikacja parametrów wieloobwodowego po stronie wtórnej schematu zastępczego silnika indukcyjnego", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 4, str. 155 – 159, 2014.
- [2]. A. Kapłon, G. Utrata, J. Rolek "Badania symulacyjne obserwatorów wielkości elektromechanicznych silnika indukcyjnego zbudowanych w oparciu o wieloobwodowy po stronie wtórnej schemat zastępczy maszyny", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 4, str. 137-142, 2013.
- [3]. A. Kapłon, G. Utrata, J. Rolek "Estimators of induction motor electromechanical quantities built on the basis of a machine secondary multi-loop equivalent circuit", *Archives of Electrical Engineering*, vol. 63, issue 2, str. 149 – 160, 2014.
- [4]. G. Utrata, J. Rolek, A. Kapłon "The Genetic Algorithm for an Electromagnetic Parameters Estimation of an Induction Motor Secondary Multi-Loop

Equivalent Circuit", *International Review of Electrical Engineering*, vol. 9 no. 6, str. 1111-1118, 2014.

- [5]. A. Kapłon "Estimation of the electrodynamic state of the three-phase induction machine based on its equivalent circuit", *Archives of Electrical Engineering*, vol. 53, no. 2, str. 163-177, 2004.
- [6]. G. Utrata, A. Kapłon "Spectral inductance of the linear motor-space harmonic analysis", *COMPEL*, vol. 30 no. 3, str. 1118 – 1131, 2011.
- [7]. K. Kubota, K. Matsuse "Speed sensorless field-oriented control of induction motor with rotor resistance adaptation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, issue 5, str. 1219-1224, 1994.
- [8]. T. Orłowska-Kowalska, M. Dybkowski, G. Tarchala "Performance analysis of the sliding-mode speed observer with magnetizing reactance estimation for the sensorless induction motor drive", *COMPEL*, vol. 30 no. 3, str. 968-978, 2011.
- [9]. L. Zhao, J. Huang, H. Liu, B. Li, W. Kong "Second-Order Sliding-Mode Observer With Online Parameter Identification for Sensorless Induction Motor Drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, issue 10, str. 5280-5289, 2014.
- [10]. J.R. Willis, G.J. Brock, J.S. Edmonds "Derivation of induction motor models from standstill frequency response tests", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 4, no 4, str. 608-615, 1989.

Autorzy

dr inż. Jarosław Rolek

e-mail: jrolek@tu.kielce.pl

dr hab. inż. Andrzej Kapłon

e-mail: akaplon@tu.kielce.pl

Katedra Elektrotechniki Przemysłowej i Automatyki
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach

Do przygotowania pracy wykorzystano aparaturę zakupioną w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013: LABIN – Wsparcie Aparaturowe Innowacyjnych Laboratoriów Naukowo-Badawczych Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Nr umowy: POPW.01.03.00-26-016/09-00.

Paca finansowana ze środków przyznanych na działalność statutową: 03.0.14.00/2.01.01.01.0004 MNSP.EKEN.14.001

mgr inż. Grzegorz Utrata,

e-mail: gutrata@is.pcz.czyst.pl

Instytut Inżynierii Środowiska

Wydział Inżynierii Środowiska i Biotechnologii

Politechnika Częstochowska

Paca finansowana ze środków przyznanych na działalność statutową: BS/MN-401-312/15