

## Ocena stanu układu napędowego z silnikiem klatkowym przy nieznannej częstotliwości napięcia zasilającego

**Streszczenie.** Współczesne układy napędowe z silnikami indukcyjnymi często wykorzystują algorytmy sterowania pracą przekształtników częstotliwości metodami, w których nie jest znana wartość częstotliwości napięcia zasilającego. Wartość chwilowa prądu i napięcia wymuszona jest przez zadaną wartość prędkości kątowej, momentu obciążenia oraz stan silnika. Algorytmy te mogą powodować, że uszkodzenie klatki nie musi mieć wpływu na kształt prądu silnika. W takich przypadkach do oceny stanu można wykorzystać przebieg napięcia zasilającego silnik. Konieczne jest, w takim przypadku, wyznaczenie wartości częstotliwości jego podstawowej harmonicznej. W niniejszym artykule przedstawiono propozycje algorytmów umożliwiające wyznaczenie współczynników prędkościoceny stanu oraz częstotliwości napięcia zasilającego na podstawie analizy przebiegu ruchomych wartości skutecznych prądu lub napięcia silnika.

**Abstract:** Modern motor drives with induction motors use voltage inverters with such control algorithms, in which supplying voltage frequency is various and unidentified. Transient current's and voltage's value is forced by rotary speed, load torque and state of motor. Those control algorithms may cause that rotor cage damage doesn't affect on motor current waveform. In those cases, supplying voltage waveform can be used for motor drive state estimation. Determination of the first harmonic of the supplying voltage frequency is also necessary. Proposition of algorithms providing state estimation factors determination and supplying voltage frequency estimation basing on motor's currents and voltages moving RMS values waveforms is presented in the paper. **Analysis of the drive with induction motor when frequency of supplying voltage is unknown**

**Słowa kluczowe:** diagnostyka, silniki indukcyjne, przekształtniki częstotliwości.

**Keywords:** diagnostics, induction motors, frequency inverters.

### Wstęp

Współczesne układy napędowe z silnikami klatkowymi wykorzystują do regulacji prędkości przekształtniki częstotliwości, sterowane przy wykorzystaniu różnorodnych algorytmów. Istotnym problemem, który nie jest obecnie rozwiązany w zadowalający sposób, jest ocena uszkodzeń silnika w czasie eksploatacji napędu. Znane algorytmy diagnostyki, oparte głównie o analizę przebiegu wartości chwilowej prądu silnika, nie są tu skuteczne [2, 6]. Wartość chwilowa prądu jest kształtowana na podstawie algorytmów wymuszających jego przebieg zależnie od kryteriów stosowanych w algorytmach sterujących. Układ regulacji prądu może powodować zmniejszenie lub nawet ukrycie efektów uszkodzeń silnika w przebiegu prądu fazowego. W takich przypadkach poszukuje się innych sygnałów, na podstawie których można wnioskować o stanie napędu. W literaturze dostępne są próby wykorzystania sygnałów mocy [9] lub momentu elektromagnetycznego silnika [6]. W przypadku dostępu do wielkości występujących w algorytmach sterowania, możliwe jest wykorzystanie sygnałów takich jak np. uchył regulatora strumienia [6] czy też ocena zmian wskaźników diagnostycznych w czasie eksploatacji napędu [6, 7].

Algorytmy diagnostyki, stosowane w praktyce, wykorzystują fakt pojawienia się w przebiegu prądu stojana składników zależnych od typu uszkodzeń [4, 8]. Dużym problemem jest tu fakt nieznannej wartości częstotliwości napięcia zasilającego. Sygnałem dostępnym jest zadana (lub zmierzona) wartość prędkości obrotowej wirnika oraz wartości chwilowe prądów i napięć silnika. Składniki prądu silnika, wynikające z wybranych typów uszkodzeń, mają częstotliwości zależne od poślizgu i częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia zasilającego [4, 8]. Pojawia się więc konieczność identyfikacji częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia (lub prądu) stojana. Dzięki uzyskaniu tej informacji możliwe jest wskazanie wartości częstotliwości w przebiegach prądu, napięcia, mocy lub drgań maszyny charakterystycznych dla danego typu uszkodzeń [4].

Uszkodzenie klatki wirnika powoduje pojawienie się oscylacji w przebiegu ruchomej wartości skutecznej prądu fazowego silnika, jak i zmianę wartości rezystancji wirnika.

Zmiana rezystancji wirnika wpływa na nachylenie charakterystyki mechanicznej silnika, powodując zwiększenie poślizgu przy takiej samej wartości momentu obciążenia [3].

W niniejszej pracy zaproponowano algorytm umożliwiający ocenę wartości prędkości synchronicznej wraz z obliczaniem współczynnika oceny stanu silnika na podstawie przebiegu prądu lub napięcia. Algorytmy sterowania pracą układu napędowego, z wykorzystaniem sprzężeń zwrotnych od prądu, prędkości oraz estymowanych wartości strumienia wymuszają kształt prądu silnika bliski sinusoidy, ukrywając w ten sposób wpływ uszkodzenia klatki wirnika. W takim przypadku składniki związane z oddziaływaniem uszkodzenia silnika powinny pojawić się w przebiegu napięcia zasilającego. Napięcie zasilające zwykle nie jest wielkością mierzoną a jego wartość chwilowa jest szacowana na podstawie znanej wartości napięcia stałego w układzie pośredniczącym oraz stanu łączników przekształtnika energoelektronicznego.

W niniejszej pracy wskazano na konieczność pomiaru napięcia międzyfazowego silnika. Obliczanie współczynników diagnostycznych dla ruchomych wartości skutecznych prądów oraz napięć zasilających maszynę indukcyjną umożliwia ocenę stanu układu bez ingerencji w proces sterowania pracą układu napędowego. Kompleksowa diagnostyka układu napędowego wymaga oceny składników związanych z możliwymi uszkodzeniami maszyny w przebiegach prądów oraz napięć silnika, jak i oceny różnicy pomiędzy prędkością synchroniczną i prędkością kątową wirnika (poślizgu) przy znanej wartości momentu obciążenia silnika.

### Szacowanie częstotliwości napięcia zasilającego

Algorytmy wykorzystujące wektorowy model maszyny klatkowej, oparte na orientacji wektora pola (FOC) lub na bezpośredniej regulacji momentu (DTC) [5], sterują pracą przekształtnika częstotliwości na podstawie zadanej prędkości kątowej. Częstotliwość napięcia zasilającego silnik wynika z aktualnego stanu maszyny, zadanej wartości prędkości oraz momentu obciążenia. Klasyczne metody diagnostyki, oparte o analizę harmoniczną wartości chwilowej prądu stojana, wymagają rejestracji dużej liczby

próbek w stosunkowo długim okresie czasu (10-20s). Nie ma tu pewności czy każdy okres przebiegu jest, w stanie ustalonym, wartością stałą.

W pracy [7] wykazano, że do oceny stanu wirnika można wykorzystać sygnał ruchomej wartości skutecznej prądu stojana. Obliczanie kwadratu tej wartości  $I_{RMS}^2$  lub napięcia  $U_{RMS}^2$ , wymaga określenia wartości okresu  $T$  podstawowej harmonicznej napięcia zasilającego silnik:

$$(1) \quad I_{RMS}^2 = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t i^2(\tau) d\tau$$

$$(2) \quad U_{RMS}^2 = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t u^2(\tau) d\tau$$

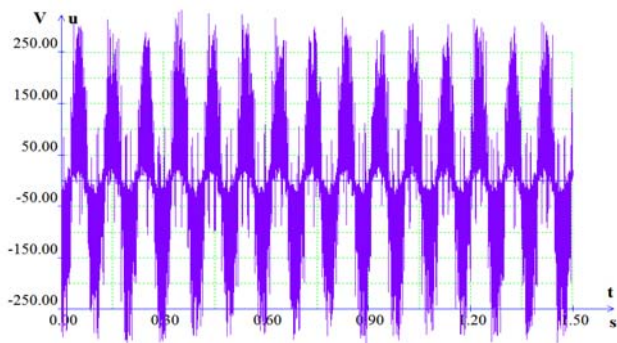
gdzie:  $i$  - wartość chwilowa prądu,  $u$  - wartością chwilową napięcia

Wyznaczenie wartości maksymalnej współczynnika  $K_u$  zblizonych do wynikającej z zadanej wartości prędkości kątowej daje możliwość określenia częstotliwości badanego przebiegu. Częstotliwość ta wyznaczona jest na podstawie okresu czasu  $T$  wyznaczonego dla maksymalnej wartości współczynnika  $K$  [7]:

$$(3) \quad K_i = \frac{I_{RMS\_MIN}^2}{I_{RMS\_MAX}^2}$$

$$(4) \quad K_u = \frac{U_{RMS\_MIN}^2}{U_{RMS\_MAX}^2}$$

Przebieg napięcia międzyfazowego silnika sterowanego metodą bezpośredniej regulacji momentem [5] (DTC- $\delta$ ) pokazano na rys.1.



Rys.1. Przebieg napięcia międzyfazowego przy sterowaniu metodą bezpośredniej regulacji momentem; zadana prędkość obrotowa  $n_z=300$  obr/min

Dla takiego przebiegu napięcia wyznaczono (rys.2) zależność współczynnika oceny stanu  $K_u$  od czasu całkowania  $T$ . Wartości maksymalne funkcji występują dla czasu będącego wielokrotnością połowy okresu podstawowej harmonicznej badanego przebiegu.

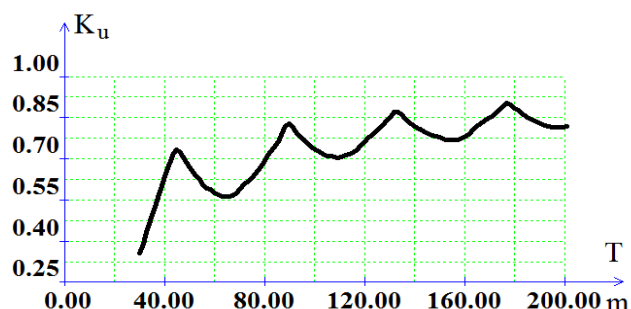
Wyznaczenie wartości maksymalnej w otoczeniu przewidywalnej częstotliwości napięcia, wynikającej z zadanej wartości prędkości obrotowej, daje możliwość oceny wartości częstotliwości badanego przebiegu, będącej wynikiem wyznaczenia okresu czasu  $T$  dla maksymalnej wartości współczynnika  $K$ . Wartość maksymalna współczynnika  $K$  dla napięcia lub prądu jest wynikiem istnienia składników o częstotliwościach, które nie są wielokrotnością częstotliwości podstawowej. Składniki te pojawiają się np. w sytuacji uszkodzenia klatki wirnika [6].

Ich Istnienie może stanowić podstawę oceny stanu układu napędowego.

Wygodniejszymi wskaźnikami oceny stanu są wartości dla prądu i napięcia ( $k_i, k_u$ ) zdefiniowane jako:

$$(5) \quad k_i = (1 - K_i)100\%$$

$$(6) \quad k_u = (1 - K_u)100\%$$

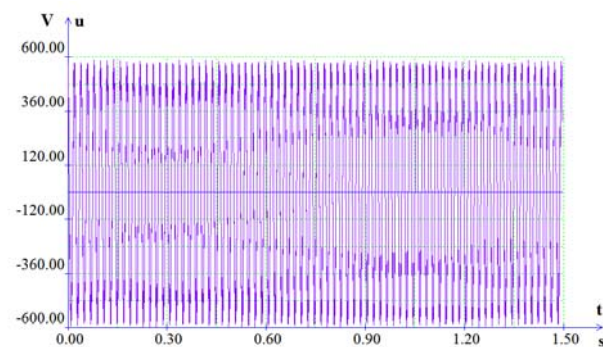


Rys.2. Kształt funkcji  $K(T)$  dla przebiegu z rys.1

Algorytm poszukiwania maksimum funkcji  $K(T)$  realizowano dwuetapowo. W etapie pierwszym poszukiwania jest wartość maksymalna w punktach o równym podziale czasu w granicach podanego zakresu częstotliwości. W drugim etapie skoncentrowano się na zwiększeniu dokładności poszukiwaniu maksimum lokalnego metodą interpolacji kwadratowej [1]. W przypadku pracy układu napędowego, z regulacją prędkości kątowej w zakresie 10-100% prędkości znamionowej, do poprawnej pracy algorytmu wystarczająca jest rejestracja wartości chwilowej prądu (lub napięcia) w okresie czasu rzędu 1 s. Opisany algorytm został zaimplementowany w autorskim programie analizy danych pomiarowych *Anagraf\_win* [7]. Program jest dostępny pod adresem: [we.pb.edu.pl/~solbut/zip/anagraf\\_win.zip](http://we.pb.edu.pl/~solbut/zip/anagraf_win.zip)

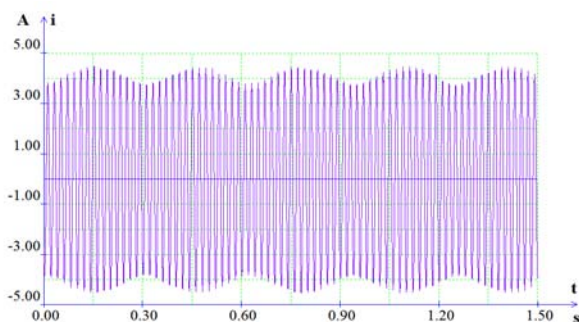
### Ocena stanu wirnika silnika klatkowego sterowanego metodą skalarną

W celu sprawdzenia poprawności opisanego wyżej algorytmu wykonano szereg badań laboratoryjnych. W przypadku sterowania układu napędowego metodą skalarną znana jest wartość pierwszej harmonicznej napięcia zasilającego, dzięki czemu możliwe jest sprawdzenie skuteczności algorytmu do obliczenia częstotliwości podstawowej harmonicznej prądu (lub napięcia). Wykonano szereg badań dla silnika typu Sh90L-4 dla różnych częstotliwości i różnych wartości momentu obciążenia dla maszyny sprawnej oraz z uszkodzonymi prętami klatki wirnika.



Rys.3. Przebieg napięcia międzyfazowego przy sterowaniu metodą skalarną – uszkodzone 6 prętów klatki wirnika  $k_u = 6,6\%$

Na rysunku 3 pokazano przebieg wartości napięcia międzyfazowego przy uszkodzonych 6 prętach klatki wirnika i obciążeniu momentem znamionowym. Jego przebieg nieznacznie zależy od skali uszkodzenia klatki silnika. Wyraźne zmiany występują natomiast w przebiegu prądu fazowego (rys.4).



Rys.4 Przebieg prądu fazowego przy sterowaniu metodą skalarną – uszkodzone 6 prętów klatki wirnika  $k_f = 29\%$

W każdym z badanych przypadków błąd oceny częstotliwości był mniejszy od 0.2%. W tabeli 1 podano przykładowe wyniki badań współczynników  $k_i$  i  $k_u$  dla przypadków maszyny sprawnej i dla uszkodzenia 3 i 6 prętów klatki wirnika. Widoczny jest wyraźny wzrost wartości współczynnika  $k_i$ , określonego dla prądu fazowego, wraz z rosnącą liczbą uszkodzonych prętów wirnika. Współczynnik obliczany dla napięcia międzyfazowego  $k_u$  ma wartość pomijalnie małą. W przypadku metody skalarnej możliwa jest ocena stanu klatki na podstawie wartości współczynnika oceny stanu obliczanego jedynie dla prądów fazowych silnika [6, 7].

Tabela 1. Wartości współczynników oceny stanu klatki wirnika  $k_u$  i  $k_i$  dla silnika Sh90L-4 przy sterowaniu metodą skalarną ( $u/f=const$ )

f [Hz]	Maszyna sprawna		Uszkodzone 3 pręty		Uszkodzonych 6 prętów	
	$k_i$ [%]	$k_u$ [%]	$k_i$ [%]	$k_u$ [%]	$k_i$ [%]	$k_u$ [%]
50	8,5	1,3	14,9	2,1	29,0	6,6
40	6,6	1,2	15,7	1,7	29,2	7,1
30	3,6	1,0	17,3	1,6	32,5	8,6
20	1,6	1,0	22,6	2,7	41,4	9,7

Ocena stanu klatki oparta jedynie na ocenie składników prądu fazowego może być jednym ze wskaźników, lecz nie zapewnia wykrycia wszystkich możliwych przypadków uszkodzeń. Z badań symulacyjnych, jak i laboratoryjnych [6] wynika, że wartość składników występujących w przebiegu prądu zależy nie tylko od liczby uszkodzonych prętów, lecz także od ich położenia na obwodzie wirnika. Kilka pękniętych prętów usytuowanych w różnych miejscach na obwodzie wirnika nie musi powodować wyraźnego zwiększenia wartości podanych wyżej wskaźników. Liczba pękniętych prętów, niezależnie od ich położenia, powoduje natomiast zwiększenie wartości wypadkowej rezystancji klatki wirnika. Zmiana taka powoduje zwiększenie nachylenia charakterystyki mechanicznej silnika [3]. Niezależnie od oceny stanu na podstawie opisanych wyżej wskaźników warto wyznaczać poślizg wirnika względem wirującego pola magnetycznego. W tabeli 2 podano wyniki pomiarów różnicy pomiędzy prędkością synchroniczną a prędkością wirowania wału wirnika dla przypadku maszyny sprawnej, z uszkodzeniem 3 kolejnych prętów klatki wirnika oraz przy 6 uszkodzonych prętach. Przy uszkodzeniu 3 prętów nie widać różnicy w pomiarach prędkości poślizgu, natomiast zwiększenie skali uszkodzenia powoduje jej

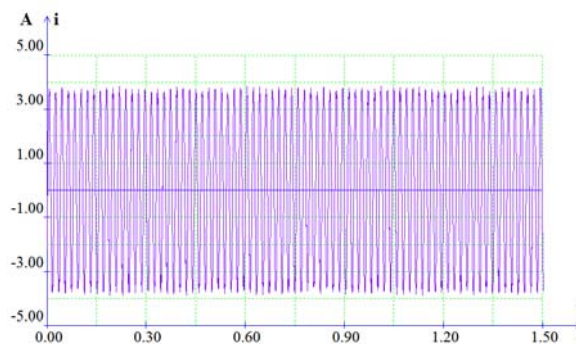
wyraźny wzrost. W skrajnych przypadkach wartość współczynnika oceny stanu może maleć, lecz jednocześnie nastąpi zwiększenie wartości poślizgu. Diagnostyka stanu klatki, w przypadku sterowania układu napędowego bez sprzężeń zwrotnych, powinna być prowadzona na podstawie zmian zarówno współczynników oceny stanu na podstawie oscylacji prądu jak i ocenie zmian poślizgu.

Tabela 2. Poślizg prędkości w obr/min silnika Sh90L-4 w zależności od ilości uszkodzonych prętów – sterowanie skalarnie, obciążenie znamionowe

f [Hz]	0 pr	3 pr	6 pr
50	47	47	50
40	45	45	50
30	47	47	48
20	48	47	55
10	65	66	74

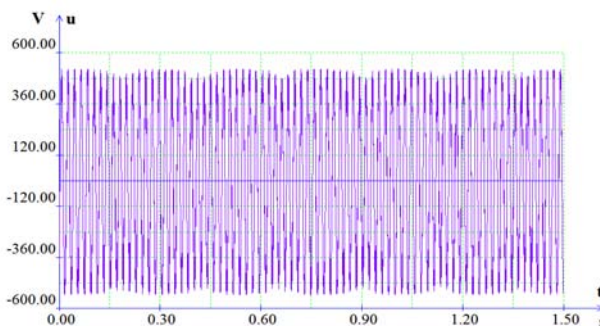
### Ocena stanu wirnika silnika klatkowego sterowanego metodą bezpośredniej regulacji momentem (DTC- $\delta$ )

Algorytmy sterowania silnika klatkowego, oparte na metodach bezpośredniej regulacji momentem [5] (DTC- $\delta$ ), powodują, że wartość chwilowa prądu jest wymuszona przez zadane wartości prędkości i strumienia silnika.



Rys.5 Przebieg prądu fazowego przy sterowaniu metodą DTC- $\delta$  – uszkodzone 6 prętów klatki wirnika  $k_f=12,2$

W przypadku sterowania tą metodą nie jest znana wartość częstotliwości napięcia zasilającego silnik. Kształt prądu jest wymuszony przez układ sterujący, a uszkodzenia klatki wirnika w nieznacznym stopniu zmieniają przebieg wartości chwilowej prądu [6] (rys.5). Wymuszenie sinusoidalnego przebiegu prądu musi powodować, odpowiednio do stanu maszyny, zmiany w kształcie napięcia silnika (rys.6).



Rys.6 Przebieg napięcia międzyfazowego przy sterowaniu metodą DTC- $\delta$  – uszkodzone 6 prętów klatki wirnika  $k_f=34,9$

W takim przypadku do oceny stanu klatki należy wykorzystać zmianę wartości współczynnika oceny dla przebiegu napięcia międzyfazowego silnika.

Tabela 3. Wartości współczynników oceny stanu klatki wirnika  $k_{ij}$  dla silnika Sh90L-4 przy sterowaniu metodą DTC- $\delta$

n [obr/min]	Maszyna sprawna		Uszkodzone 3 pręty		Uszkodzonych 6 prętów	
	$k_i$ [%]	$k_{ij}$ [%]	$k_i$ [%]	$k_{ij}$ [%]	$k_i$ [%]	$k_{ij}$ [%]
1500	4,5	6,4	6,4	12,9	12,2	34,9
1200	4,6	4,8	4,8	12,1	6,4	36,3
800	5,5	7,2	7,2	13,6	7,5	48,5
600	1,6	22,6	22,6	2,7	4,1	40,0

W tabeli 3 pokazano przykładowe wyniki badań maszyny sterowanej metodą DTC- $\delta$  [5] dla silnika sprawnego oraz z uszkodzonymi 3 i 6-cioma prętami klatki wirnika. Widoczny jest efekt niewielkich zmian współczynnika oceny dla prądu, przy znacznym zwiększeniu wartości współczynnika oceny stanu liczonego dla przebiegu napięcia międzyfazowego. Należy podkreślić, że proporcje zmian współczynników dla prądu i napięcia są zależne od jakości układów regulacji oraz od stopnia uszkodzeń jak i położenia uszkodzonych prętów na obwodzie wirnika. W przypadku sterowania za pomocą algorytmów z wykorzystaniem sprzężeń zwrotnych nie znana jest wartość częstotliwości napięcia zasilającego. Znana jest wartość prędkości zadanej. Do oceny stanu silnika, jak i do wskazania przyczyn zmiany stanu, często wykorzystujemy informację o zależności częstotliwości drgań od poszczególnych typów uszkodzeń [4]. Do wyznaczenia tych częstotliwości potrzebna jest informacja o prędkości kątowej wirnika jak i prędkości wirowania pola magnetycznego. Informację o prędkości wirowania pola magnetycznego możemy uzyskać stosując opisany wyżej algorytm szacowania częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia (lub prądu). Podobnie, jak przy sterowaniu metodą skalarną, większa skala uszkodzeń powinna, przy takiej samej wartości momentu obciążenia, powodować zwiększenie poślizgu. W tabeli 4 pokazano przykładowe wyniki badań poślizgu w zależności od stopnia uszkodzenia. Przy 3 prętach zmiana jest praktycznie niezauważalna, natomiast uszkodzenie 6 prętów wyraźnie powoduje zwiększenie poślizgu wirnika.

Tabela 4. Poślizg prędkości w obr/min silnika Sh90L-4 w zależności od ilości uszkodzonych prętów – sterowanie DTC- $\delta$ , obciążenie znamionowe

$n_z$ [obr/min]	0 pr	3 pr	6 pr
1500	45,6	47,0	65,0
1200	40,2	44,4	52,8
900	40,0	41,0	49,0
600	37,0	39,0	52,0
300	36,0	34,0	42,6

### Uwagi i wnioski

Ocena stanu układu napędowego w przypadku wykorzystania sprzężeń zwrotnych od prędkości kątowej, prądu czy strumienia ogranicza możliwość stosowania algorytmów diagnostycznych opartych na analizie harmonicznej prądu silnika [6]. Algorytmy sterujące mogą wprowadzać do przebiegu prądu składniki o podobnej częstotliwości, jak te wynikające z uszkodzenia silnika [2, 6]. Istotnym ograniczeniem jest także konieczność rejestracji dużej liczby próbek pomiarowych w dłuższym okresie czasu. W przypadku zasilania silnika napięciem o

częstotliwości 50 Hz wymagana jest rejestracja przebiegu prądu w okresie co najmniej 10 s [4]. Przy zmniejszeniu częstotliwości wymagane jest zwiększenie okresu czasu proporcjonalnie do wzrostu okresu podstawowej harmonicznej napięcia zasilającego. W tym czasie może nastąpić zmiana stanu obciążenia, utrudniając diagnostykę.

Proponowane w pracy metody diagnostyczne opierają się na algorytmie obliczeń kwadratu ruchomej wartości skutecznej prądu i napięcia silnika oraz na ocenie oscylacji tych wielkości poprzez stosowanie współczynników oceny stanu jako proporcji pomiędzy wartością minimalną i maksymalną kwadratu ruchomej wartości skutecznej prądu lub napięcia. Do obliczenia wartości proponowanych współczynników wystarczy rejestracja przebiegów w czasie wymuszonym przez jeden okres oscylacji przebiegu ruchomej wartości skutecznej. Przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań uzyskano przy czasie rejestracji równym 1,5 s. Czas ten jest wystarczający nawet przy częstotliwości napięcia zasilającego rzędu 10 Hz.

Kompleksowa diagnostyka układu napędowego wymaga oceny przebiegu prądu fazowego silnika oraz jego symetrii [6], napięcia zasilającego oraz oceny zmian poślizgu przy znanej wartości momentu obciążenia silnika.

*Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/W/E/3/2013 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW*

*Autorzy: dr hab. inż. Adam Sołbut, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, E-mail: a.solbut@pb.edu.pl.*

### LITERATURA

- [1] Brandt S., Analiza danych, WNT, Warszawa 1999.
- [2] Dybowski P., Wpływ zasilania napięciem odkształconym na widmo prądów stojana cz.2, XIII Seminarium Techniczne: Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych, Eksploatacja, diagnostyka i modernizacja silników elektrycznych, maj, Ustroń Jaszowiec, 2004, s.84-92.
- [3] Glinka T., Maszyny elektryczne i transformatory. Podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL 2015.
- [4] Kowalski Cz. T., Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013
- [5] Sikorski A.: Bezpośrednia regulacja momentu i strumienia silnika indukcyjnego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2009, s. 234.
- [6] Sołbut A., Ocena stanu układów napędowych z maszyną asynchroniczną, Rozprawy naukowe nr 239, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 2013.
- [7] Sołbut A., Wieloetapowy proces diagnostyki układów napędowych, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* Nr 1/2017 (113).
- [8] Swędrowski L., Nowa metoda diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego oparta na pomiarze i analizie widmowej prądu zasilającego, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, nr.54, Gdańsk 2005.
- [9] Zagirnyak M. V., Mamchur D.G., Kalinov A. P., Chumachowa A. V., Induction motors diagnostics based on the power consumption signal analysis, IPublisher PE Sherbatykh A. V., Kremenchuk 2013.