

## Diagnostyka uszkodzeń elektrycznych silnika indukcyjnego zasilanego z przemiennika częstotliwości w zamkniętej strukturze sterowania

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zagadnienie wczesnego wykrywania uszkodzeń elektrycznych silnika indukcyjnego zasilanego z przemiennika częstotliwości w zamkniętej strukturze sterowania DFOC. Wzięto pod uwagę uszkodzenia zarówno stojana, w postaci zwarcia zwojowych oraz wirnika – pękniętych prętów. Przeprowadzono badania eksperymentalne napędu przy różnych prędkościach oraz wartościach momentu obciążenia. W celu jednoczesnej diagnostyki obu uszkodzeń wykorzystano jeden z sygnałów wewnętrznych układu sterowania.

**Abstract.** This paper deals with an early detection of electrical damages of an induction motor supplied by a voltage source inverter in the closed-loop control structure DFOC. Both stator damages, in the form of shorted turns, and rotor damages, in the form of broken bars, are taken into consideration. Experimental tests have been conducted for different speed and torque values. In order to diagnose both damages simultaneously one of the internal signals from the control structure is utilized. (**Diagnosis of electrical damages of an induction motor supplied from a frequency converter in closed-loop control structure**).

**Słowa kluczowe:** silnik indukcyjny, uszkodzenia stojana i wirnika, diagnostyka, struktura DFOC

**Keywords:** induction motor, stator and rotor faults, diagnostics, DFOC structure

### Wstęp

Przekształtnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi (SI) są powszechnie stosowane w wielu procesach przemysłowych, tym samym problemy związane z wykrywaniem uszkodzeń elektrycznych i mechanicznych stają się coraz bardziej istotne.

W skład współczesnego układu napędowego, oprócz samego silnika napędowego wchodzi wiele wyspecjalizowanych urządzeń, które stanowią układy zasilania i energoelektroniki (przekształtnik częstotliwości z modulacją PWM), układy pomiarowe oraz sterowania. Każde z tych urządzeń jest narażone na wystąpienie uszkodzeń, które w konsekwencji mogą powodować zakłócenie normalnej pracy układu napędowego i wymagają podjęcia odpowiedniego działania przez układ sterowania.

Według [1 - 3] częstymi uszkodzeniami silników indukcyjnych są uszkodzenia elektryczne i stanowią od 20% do 40% wszystkich uszkodzeń. Dotyczą one zarówno obwodu stojana (zwarcia zwojowe) jak również obwodu wirnika (dla silnika klatkowego – pęknięte pręty).

Uszkodzenia uzwojeń stojana zaczynają się jako niezauważalne zwarcie zwojowe, które szybko rozprzestrzenia się na całe uzwojenie powodując w konsekwencji zwarcie główne, które najczęściej prowadzi do awaryjnego zatrzymania silnika. Z drugiej strony silniki indukcyjne charakteryzują się dużą odpornością na uszkodzenia klatki wirnika, niemniej jednak pęknięcie nawet jednego pręta prowadzi do zmniejszenia momentu obrotowego silnika, a więc wzrostu wartości prądów fazowych oraz poślizgu.

W przypadku wystąpienia tego typu uszkodzeń w silniku pracującym w zamkniętej strukturze sterowania polowo-zorientowanego, zmiana wartości parametrów uzwojeń stojana i wirnika powoduje zaburzenia w prawidłowym działaniu struktury sterowania częstotliwościowego (nieprawidłowa wartość estymowanych strumieni) [4-6]. Niekontrolowany wzrost stopnia uszkodzenia powoduje w konsekwencji niestabilną pracę napędu [7]. Dlatego też ważne jest, aby wykrycie uszkodzenia nastąpiło możliwie jak najszybciej. W zależności od rodzaju i mocy napędu może to być od kilku do kilkunastu sekund. Jak wykazano m.in. w [4, 5] można w tym celu z powodzeniem wykorzystać wewnętrzne sygnały struktury sterowania

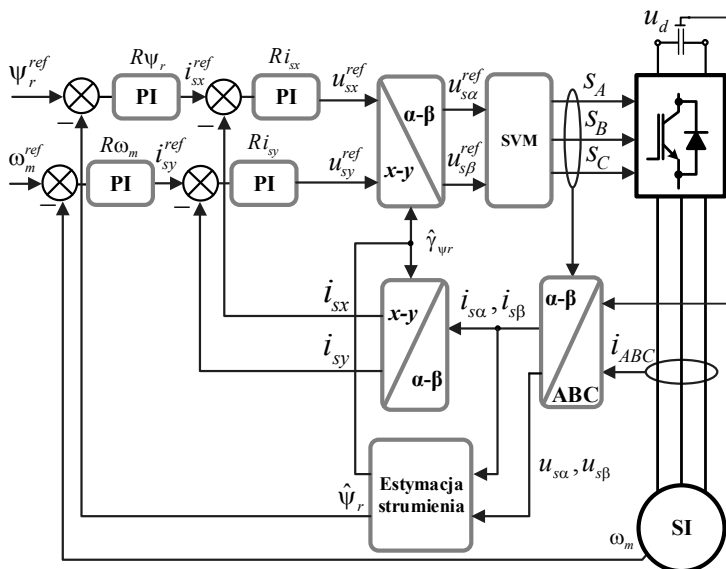
napędem. W związku z tym, celem pracy jest opracowanie metody jednoczesnej diagnostyki uszkodzeń stojana i wirnika silnika indukcyjnego, przy wykorzystaniu sygnałów napięć sterujących, pochodzących z układu sterowania polowo – zorientowanego.

Artykuł składa się z ośmiu nienumerowanych rozdziałów. W następnym rozdziale opisano w skrócie wykorzystaną metodę sterowania silnikiem indukcyjnym. Następnie opisano stanowisko do badań eksperymentalnych. Kolejny rozdział przedstawia działanie układu sterowania polowo-zorientowanego w postaci przebiegów czasowych podczas wystąpienia uszkodzeń uzwojeń silnika. Następnie opisano zaproponowaną metodę diagnostyczną oraz w dwóch kolejnych rozdziałach wyniki otrzymanych badań. Całość została krótko podsumowana.

### Polowo-zorientowany układ sterowania silnikiem indukcyjnym

W niniejszym artykule rozpatruje się możliwość diagnostyki uszkodzeń elektrycznych silnika indukcyjnego, pracującego w zamkniętej, polowo-zorientowanej strukturze sterowania. Do badań wybrano klasyczną metodę sterowania wektorowego, zorientowanego względem wektora strumienia wirnika DFOC. Metoda ta cechuje się bardzo dobrymi właściwościami statycznymi, jak i dynamicznymi. Jednakże, może także kompensować wpływ wczesnej fazy uszkodzenia uzwojeń silnika, powodując, że diagnostyka w takim układzie jest bardziej wymagająca, niż w przypadku sterowania skalarnego ( $u/f=\text{const}$ ) lub w przypadku zasilania silnika bezpośrednio z sieci.

Schemat omawianej metody sterowania przedstawiono na rysunku 1. Główna część układu sterowania składa się z czterech regulatorów, pracujących w układzie współrzędnych  $x$ - $y$ , zorientowanym względem wirującego wektora przestrzennego strumienia wirnika. Składowa wektora przestrzennego prądu stojana  $i_{sx}$  w takim układzie wykorzystywana jest do sterowania wartością amplitudy strumienia wirnika (stabilizowanej na wartości znamionowej lub odpowiednio mniejszej w przypadku osłabiania pola). Składowa  $i_{sy}$  (odpowiadająca za moment elektromagnetyczny) wykorzystywana jest do kontroli prędkości kątowej silnika.



Rys.1. Zastosowany układ sterowania silnikiem indukcyjnym

Wyznaczone wartości zadanych składowych wektora przestrzennego prądu stojana porównywane są z wartościami obliczonymi, a te z kolei stanowią wejścia dwóch wewnętrznych regulatorów napięcia. Otrzymane sygnały transformowane są z układu x-y do stacjonarnego układu  $\alpha$ - $\beta$ , po czym stanowią wartości wejściowe napięcia dla modulatora wektorowego (ang. SVM – Space Vector Modulation).

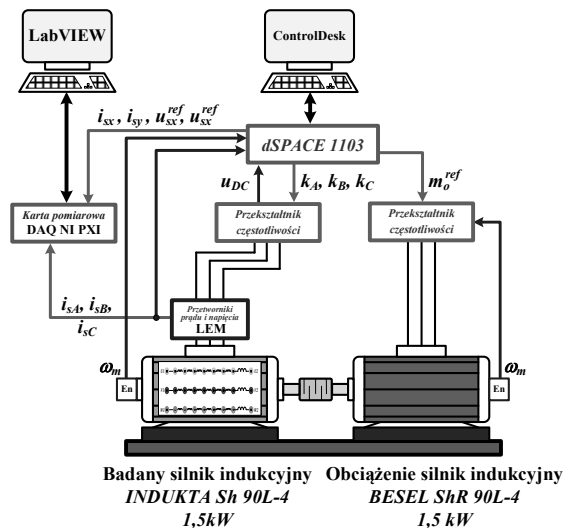
W celu poprawnej pracy napędu, w układzie sterowania musi znaleźć się również estymator wektora strumienia wirnika, który wyznaczy amplitudę (stabilizowaną) oraz kąt wektora (wykorzystywany do transformacji układów współrzędnych). Zakłada się, że prędkość układu jest mierzona.

W kolejnych rozdziałach przedstawiony zostanie opis stanowiska eksperymentalnego, na którym przeprowadzono badania oraz wyniki, które otrzymano.

### Stanowisko do badań eksperymentalnych

Na rysunku 2 przedstawiono układ, który wykorzystano do przeprowadzenia badań eksperymentalnych. Układ ten podzielić można na dwie części, sprzętową oraz sterująco-diagnostyczną.

Na część sprzętową składają się dwa silniki indukcyjne, dwa przemienniki częstotliwości oraz układy pomiarowe. Jeden z silników, Indukta Sh90L-4 1,5 kW, jest silnikiem badanym, posiadającym specjalnie przygotowane uzwojenie stojana, pozwalające na modelowanie od 1 do 8 zwarcz zwojowych w każdej fazie silnika (parametry badanego silnika zostały przedstawione w załączniku). Modelowanie zwarcz realizowano przy wykorzystaniu zewnętrznego zestawu stycznikowego, bez dodatkowej rezystancji w pętli zwarciowej. Ponadto, istniała również możliwość wymiany wirników badanego silnika pomiędzy: wirnikiem nieuszkodzonym, wirnikiem z jednym uszkodzonym prętem i wirnikiem z dwoma uszkodzonymi prętami. Drugi silnik indukcyjny Besel ShR 90L-4 1,5 kW służy jako obciążenie. Oba silniki posiadają enkodery inkrementalne firmy Kuebler do dokładnego pomiaru prędkości kątowej. Zasilane były one z identycznych przemienników częstotliwości TWERD MFC 710 5,5 kW z dwupoziomowymi falownikami napięcia. Przekształtnik zasilający badany silnik ma możliwość sterowania przy



Rys.2. Stanowisko badawcze

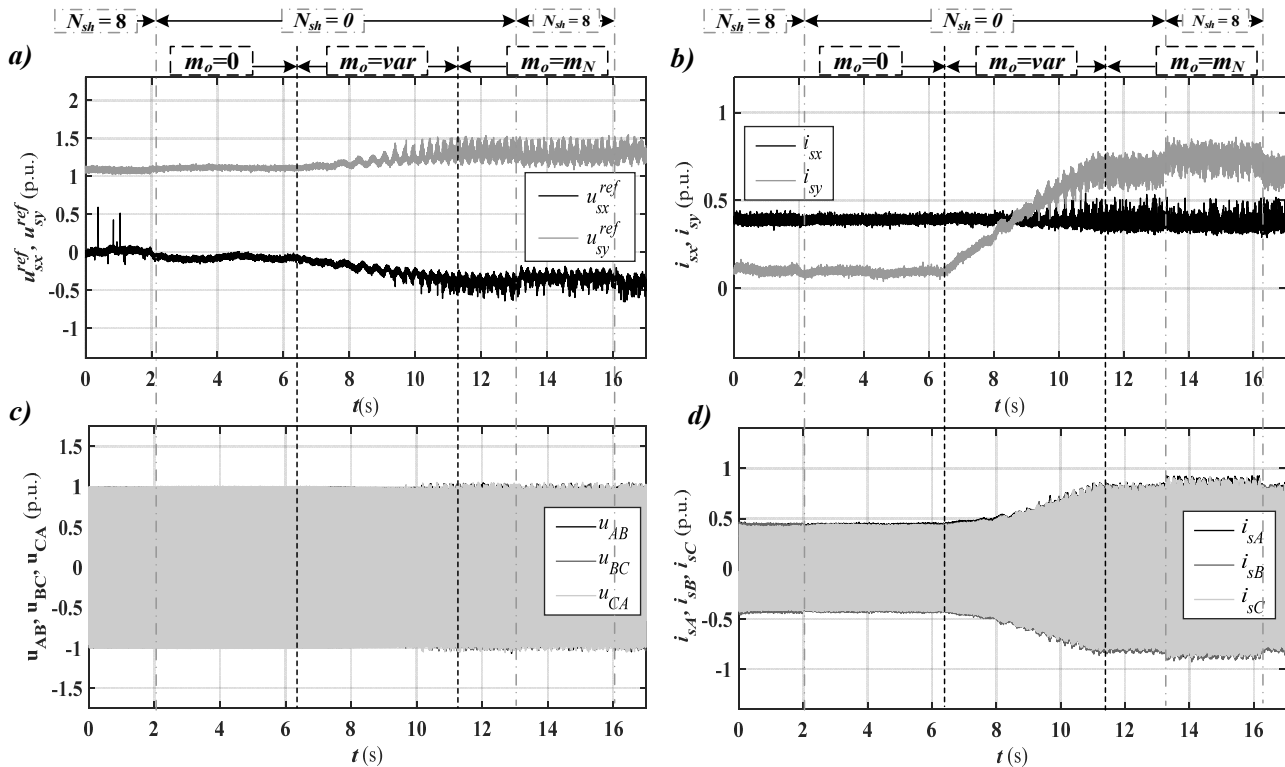
wykorzystaniu przewodów światłowodowych. Do pomiaru prądów wykorzystane zostały czujniki firmy LEM.

Część sterująco-diagnostyczna składa się zasadniczo z dwóch głównych elementów. Do zaimplementowania układu sterowania wykorzystany został układ szybkiego prototypowania dSpace DS1103, natomiast do utworzenia algorytmów diagnostycznych wykorzystano system National Instruments PXI wraz z kartą pomiarową DAQ. Algorytm sterowania DFOC (skalowanie sygnałów pomiarowych, regulatory, estymator, modulator) zostały przygotowane w Simulinku. Algorytm sterowania wykorzystuje sygnały pomiarowe prądów fazowych  $i_{sA}$ ,  $i_{sB}$ ,  $i_{sC}$ , prędkości  $\omega_m$  oraz napięcia w układzie pośredniczącym  $u_{DC}$  oraz definiuje cyfrowe sygnały sterujące łącznikami falownika napięcia  $k_A$ ,  $k_B$ ,  $k_C$ . DSpace przesyła również żadaną wartość momentu obciążenia  $m_o^{ref}$  do drugiego przekształtnika napięcia. Dodatkowo układ zabezpieczony jest przed zwarcie poprzez sprzętowy czas martwy (ang. dead-time). Wybrane sygnały z układu sterowania przesyłane są do układu diagnostycznego NI w sposób analogowy.

W badaniach wykorzystano dwa rodzaje oprogramowania: ControlDesk do wizualizacji i kontroli procesu regulacji oraz LabView do ekstrakcji i wizualizacji sygnałów diagnostycznych.

### Działanie układu sterowania polowo-zorientowanego podczas uszkodzeń stojana i wirnika silnika indukcyjnego

Na rysunku 3 przedstawiono działanie opisanego powyżej układu sterowania silnikiem indukcyjnym w przypadku wystąpienia podwójnego rodzaju uszkodzeń elektrycznych. Przedstawione wyniki otrzymane zostały podczas badań eksperymentalnych, przy pracy ze stałą, znamionową prędkością. Założono także, że w trakcie pracy układu napędowego uszkodzone były stale dwa pręty wirnika. Z oczywistych powodów nie była możliwa zmiana liczby uszkodzonych prętów w trakcie pracy układu napędowego. Z drugiej strony, specjalna konstrukcja silnika umożliwiła ręczne zmiany liczby zwartych zwojów silnika, co widać na rys. 3. Przedstawione działanie układu sterowania rozpoczyna się od 8 zwartych zwojów. Następnie, po około 2 sekundach następuje powrót do normalnej pracy. Również pomiędzy ok. 13 a 16 sekundą trwania przebiegów dokonano zwarcia 8 zwojów jednego z uzwojeń stojana.



Rys.3. Działanie układu sterowania DFOC silnikiem indukcyjnym dla  $\omega_m=1$  i  $N_{bb}=2$  w przypadku powstania uszkodzeń elektrycznych (permanentne uszkodzenie 2 prętów wirnika, czasowe zwarcia 8 zwojów): a) napięcia zadane w układzie x-y, b) składowe wektora prądu stojana w układzie x-y, c) napięcia międzyfazowe, d) prądy fazowe stojana; praca przy prędkości znamionowej i zmiennym momencie obciążenia

Jak można zauważyć na rys. 3, układ zaczyna pracę bez momentu obciążenia, po czym następuje powolna zmiana momentu (od ok. 6,5 do 11,5 sekundy) do wartości momentu znamionowego.

Na rys. 3a przedstawiono dwie składowe przestrzennego wektora napięcia zadanego w wirującym układzie współrzędnych. W przebiegu obu składowych zauważyć można charakterystyczne oscylacje, pojawiające się wraz ze zwiększaniem się momentu obciążenia – oscylacje te związane są z faktem uszkodzenia dwóch prętów wirnika. Gdy moment jest niewielki, oscylacje te są niezauważalne. Pojawienie się 8 zwarc zwojowych nie wpływa znacząco na wartości chwilowe sygnałów napięć. Składowe wektora przestrzennego prądu stojana przedstawiono z kolei na rysunku 3b. W obu przebiegach zauważyć można również charakterystyczne oscylacje, o których wspomniano powyżej. Jak wynika z zasady działania układu sterowania polowo-zorientowanego sygnał  $i_{sx}$  jest praktycznie stały (stała wartość amplitudy strumienia wirnika), natomiast składowa  $i_{sy}$  zmienia się wraz z momentem obciążenia (aby zachować stałą prędkość, moment silnika, za który odpowiada wspomniana zmienna, musi być równy momentowi obciążenia). Zwarcie 8 zwojów wpływa na zmianę wartości składowej  $i_{sy}$ , ale zmiana ta nie może stanowić bezpośrednio sygnału diagnostycznego, ponieważ może być pomyłona ze zmianą momentu silnika (np. na skutek zmian momentu obciążenia). Podobnie, amplituda napięć międzyfazowych (rys. 3c), czy prądów fazowych stojana (rys. 3d) nie może być bezpośrednio podstawą do wnioskowania o awarii silnika.

### Metodyka badań diagnostycznych

Do diagnostyki uzwojeń stojana i wirnika zaproponowano analizę widmową sygnałów diagnostycznych dostępnych w wewnętrznej strukturze sterowania. W analizie tej poszukiwane są symptomy uszkodzeń w postaci charakterystycznych częstotliwości

zwanych częstotliwościami uszkodzeniowymi [4, 8]. W przypadku sygnałów nieokresowych są to częstotliwości:

- dla uszkodzenia wirnika (bb – ang. broken bar):

  - (1)  $f_{bb} = 2sf_s$

- dla uszkodzenia stojana (sh – ang. shorted turn):

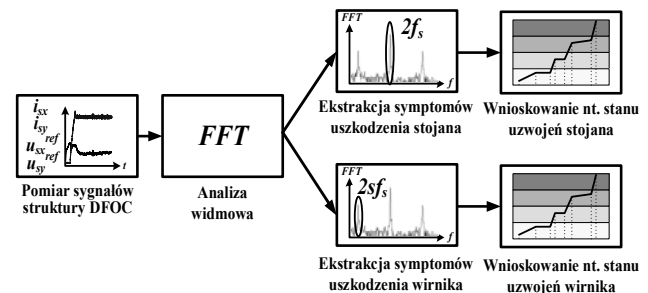
  - (2)  $f_{sh} = 2f_s$

gdzie:

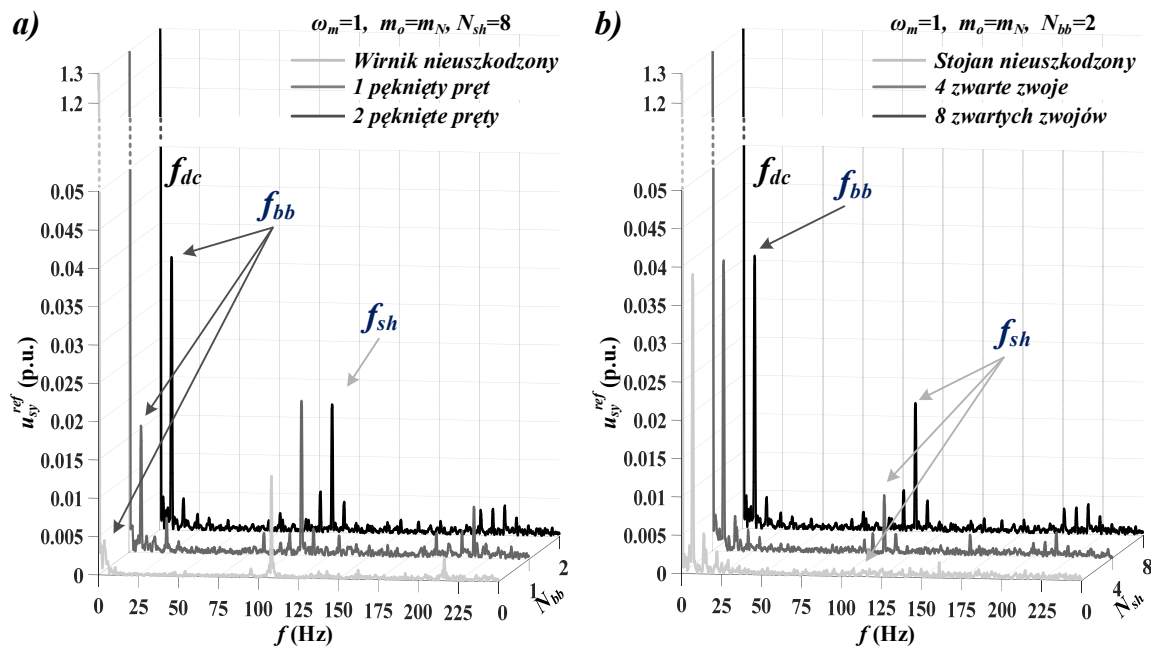
$s$  – poślizg,

$f_s$  – częstotliwości napięcia zasilania.

Na rys. 4 przedstawiono proponowaną procedurę diagnostyczną uszkodzeń elektrycznych, której końcowe wnioskowanie o stanie silnika polega na ocenie zmian amplitud charakterystycznych harmonicznych wyodrębnieniach w procesie diagnostycznym. Amplitudy wybranych częstotliwości wyznaczone były przy wykorzystaniu szybkiej transformaty Fouriera (ang. FFT – Fast Fourier Transform). Wybrane sygnały, których dotyczy może wspomniana analiza przedstawione zostały na rys. 4 – są to składowe przestrzennych wektorów prądu stojana oraz napięcia sterującego.



Rys.4. Procedura diagnostyczna uszkodzeń elektrycznych silnika indukcyjnego



Rys. 5. Widmo napięcia zadanego  $u_{sy}^{ref}$  w przypadku  $\omega_m=1$  i  $m_o=m_N$  dla: a) zwarcia 8 zwojów i różnych stanów uzwojeń wirnika, b) pękniętych 2 prętów wirnika i różnych stanów uzwojeń stojana

Badania eksperymentalne przeprowadzono dla zwarcia zwojowych modelowanych fizycznie w fazie A silnika (zwarcia 1, 2, 3, 4, 5 i 8 zwojów) oraz dla uszkodzonych 1 i 2 prętów klatki wirnika. Uszkodzenia były diagnozowane jako niesymetrie występujące osobno bądź jednocześnie podczas pracy silnika.

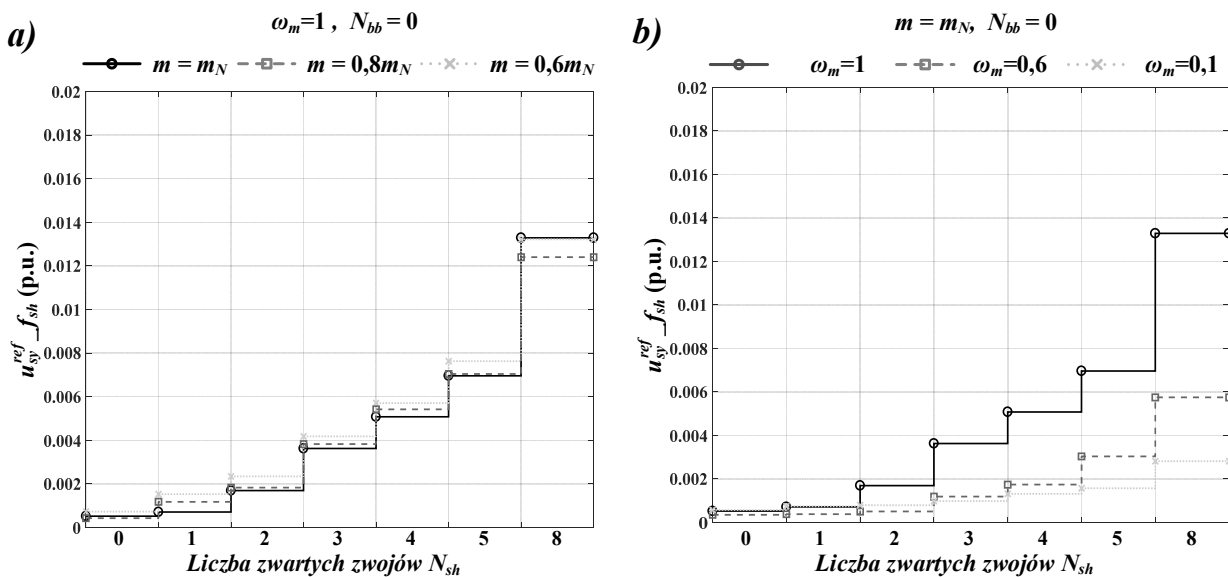
Przedstawione szczegółowe wyniki badań eksperymentalnych dotyczą tylko analizy sygnału napięcia sterującego (referencyjnego) w osi y oznaczonego jako  $u_{sy}^{ref}$ .

Na rysunku 5 przedstawiono widma napięcia zadanego  $u_{sy}^{ref}$  w przypadku  $\omega_m=1$  i  $m_o=m_N$  dla zwarcia 8 zwojów i różnego stanu uzwojeń wirnika (a) oraz pękniętych 2 prętów wirnika i różnego stanu uzwojeń stojana (b). Na rys. 5a widoczne są zmiany amplitudy harmonicznej o częstotliwości  $f_{bb}$  charakterystycznej dla uszkodzenia

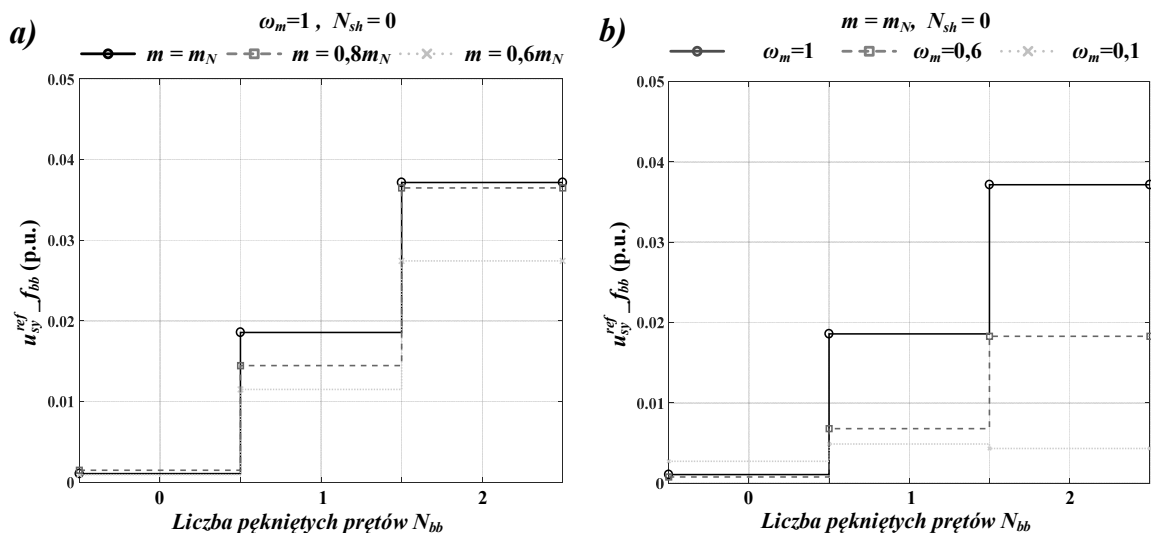
wirnika – wraz ze wzrostem stopnia uszkodzenia (1 i 2 pęknięte pręty) wzrasta amplituda.

Z drugiej strony, amplituda harmonicznej o częstotliwości charakterystycznej dla uszkodzenia stojana  $f_{sh}$  pozostaje praktycznie na niezmiennym poziomie. W przypadku postępującego uszkodzenia uzwojenia stojana (zwarcie 4 i 8 zwojów) widoczny jest wzrost amplitudy harmonicznej o częstotliwości  $f_{sh}$  charakterystycznej dla uszkodzenia stojana. Amplituda harmonicznej o częstotliwości  $f_{bb}$  pozostaje w tym czasie na niezmiennym poziomie (rys. 5b).

Z przedstawionych wyników badań wynika, że możliwe jest wyodrębnienie z widma sygnału sterującego  $u_{sy}^{ref}$  charakterystycznych harmonicznych o częstotliwościach dla uszkodzenia uzwojenia wirnika i stojana, nawet jeśli uszkodzenia te występują jednocześnie.



Rys. 6. Zmiany wartości amplitudy składowej  $f_{sh}$  napięcia sterującego  $u_{sy}^{ref}$  dla różnej liczby zwartych zwojów w przypadku: a)  $\omega_m=1, N_{bb}=0$  oraz różnego obciążenia  $m_o$  silnika, b)  $m_o=m_N, N_{bb}=0$  oraz różnych prędkości  $\omega_m$  silnika



Rys. 7. Zmiany wartości amplitudy składowej  $f_{bb}$  napięcia sterującego  $u_{sy}^{ref}$  dla różnej liczby pękniętych prętów wirnika w przypadku: a)  $\omega_m=1$ ,  $N_{sh}=0$  oraz różnego obciążenia  $m_o$  silnika, b)  $m_o=m_N$ ,  $N_{sh}=0$  oraz różnych prędkości  $\omega_m$  silnika

### Wpływ prędkości kątowej oraz momentu obciążenia na diagnostykę uzwojeń silnika indukcyjnego

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych napięcia sterującego  $u_{sy}^{ref}$  dla różnych wartości momentu obciążenia i prędkości silnika oraz różnego stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana. Można zauważyć, że moment obciążenia ma niewielki wpływ na zmiany amplitudy składowej  $2f_s$  (rys. 6a). Z drugiej strony, wraz ze zmniejszeniem prędkości silnika zmniejsza się intensywność wzrostu wartości amplitudy składowej  $2f_s$  (rys. 6b) pod wpływem narastającego uszkodzenia stojana. Możliwe jest jednak prowadzenie monitorowania zmian tej składowej sygnału  $u_{sy}^{ref}$  już przy zwarciu 1-2 zwojów.

Rys. 7 przedstawia zestawienie wyników badań napięcia zadanego  $u_{sy}^{ref}$  dla różnych wartości momentu obciążenia i prędkości silnika oraz różnego stopnia uszkodzenia uzwojenia wirnika. Można zauważyć, że pęknięcie jednego pręta powoduje znaczny wzrost amplitudy składowej  $2f_s$ . Zmiany te w dużym stopniu zależą od obciążenia silnika, gdyż brak obciążenia silnika uniemożliwia monitorowanie stanu uzwojenia wirnika. Dodatkowo, przy zmniejszaniu prędkości silnika zmniejsza się również intensywność wzrostu amplitudy  $2f_s$  pod wpływem uszkodzenia. Przy niskiej prędkości (rzędu 10% wartości znamionowej) kłopotliwe staje się określenie stopnia uszkodzenia (czerwona linia na rys. 7b). Możliwe jest jednak prowadzenie monitorowania zmian tej składowej sygnału  $u_{sy}^{ref}$  już przy uszkodzonym jednym pręcie wirnika przy zapewnieniu obciążenia silnika.

### Diagnostyka on-line uszkodzeń elektrycznych silnika

Kolejnym etapem badań diagnostycznych było sprawdzenie poprawności monitorowania zmian wartości amplitudy składowych uszkodzeniowych  $f_{sh}$  oraz  $f_{bb}$  podczas pracy on-line silnika. W tym celu przeprowadzono badanie silnika o uszkodzonych 2 prętach wirnika pracującego z prędkością  $\omega_m=1$  w trakcie zmiany obciążenia z  $m_o=0$  do  $m_o=m_N$ , w którym dodatkowo zamodelowano fizycznie chwilowe zwarcie 8 zwojów w fazie A silnika (rys. 8). Można zauważyć, że uszkodzenie 2 prętów wirnika w przypadku braku obciążenia silnika (do około 7 s pracy silnika; praca z  $m_o=0$ ) nie daje jakichkolwiek oznak zarówno w przebiegu składowej napięcia  $u_{sy}^{ref}$  (rys. 8a), jak i analizowanych charakterystycznych harmonicznym tego napięcia (rys. 8b i 8c). Po obciążeniu silnika pojawiają się dodatkowe oscylacje w przebiegu napięcia  $u_{sy}^{ref}$  (rys. 8a). Wynikają one bezpośrednio z pojawienia się składowej uszkodzeniowej  $f_{bb}$

wskazującej na uszkodzenie wirnika w pracującym silniku (rys. 8c). Chwilowe modelowanie zwarcia 8 zwojów nastąpiło w dwóch stanach pracy silnika – bez obciążenia (od 0,5s do 2s) oraz z obciążeniem znamionowym (od 13,5s do 16,5s). W przypadku analizowania przebiegu napięcia (rys. 8a) trudno doszukać się wyraźnych zmian sygnału. Uwidaczniają się one jedynie w trakcie analizy składowej uszkodzeniowej  $f_{sh}$  wskazującej bezpośrednio na uszkodzenie uzwojenia stojana w zadanych chwilach pracy silnika. Ponadto można zauważyć, że oba te uszkodzenia nie zakłócają diagnostyki przy wykorzystaniu monitorowania odpowiednich składowych uszkodzeniowych.

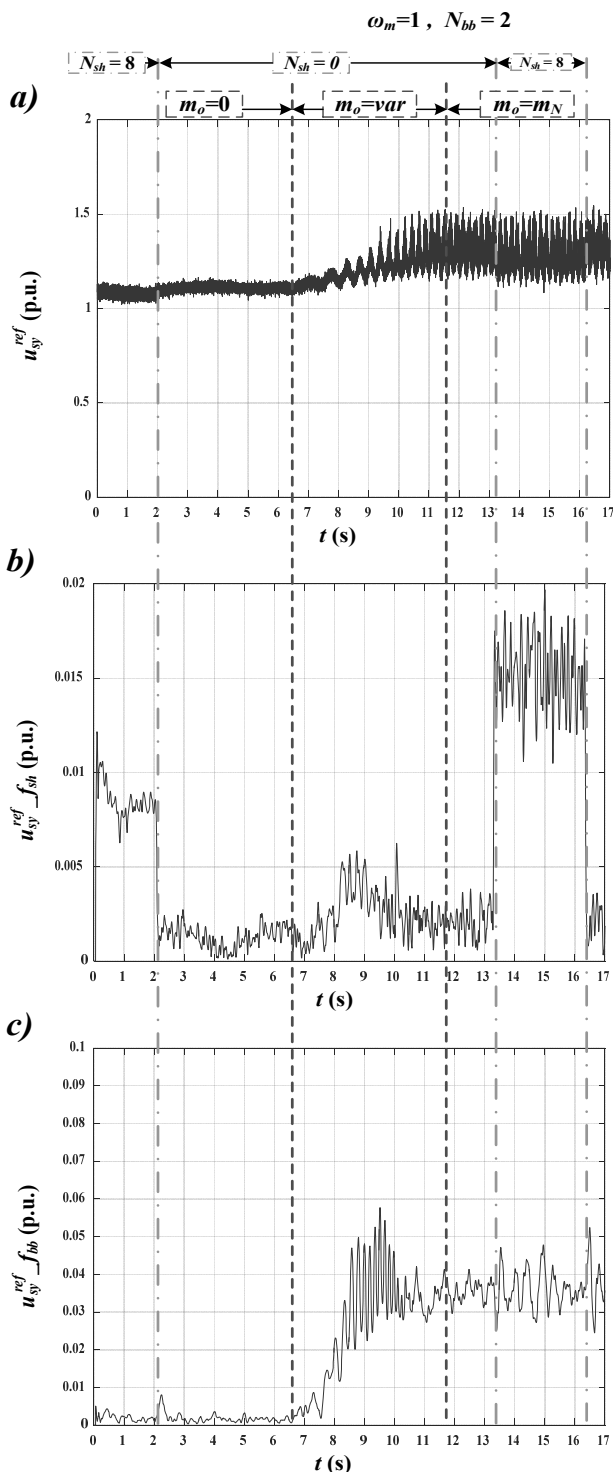
### Podsumowanie

W artykule przedstawiono możliwość diagnozowania dwóch wybranych uszkodzeń silnika indukcyjnego pracującego w zamkniętym układzie sterowania. Wśród analizowanych uszkodzeń znalazły się zwarcia zwojowe uzwojeń stojana oraz uszkodzenia wirnika, w postaci pękniętych prętów. Założono, że wymienione uszkodzenia mogą pojawić się zarówno samodzielnie, jak i równocześnie.

Z przedstawionych wyników badań wynika, że możliwe jest diagnozowanie stanu uzwojeń silnika w zamkniętym, polowo-zorientowanym układzie sterowania silnikiem indukcyjnym (DFOC). Wykorzystanie analizy widmowej FFT pozwala na wyodrębnienie harmonicznym o częstotliwościach charakterystycznych dla każdego z wymienionych uszkodzeń. Wartości amplitud tych harmonicznym mogą wskazać na rosnący poziom uszkodzenia, przy czym, jak pokazały badania są one niezależne od siebie. Tak więc, możliwa jest diagnostyka obu uszkodzeń, nawet jeśli wystąpią one równocześnie. W artykule zaproponowano wykorzystanie jednego z zadanych sygnałów napięcia w układzie współrzędnych wirującym synchronicznie z przestrzennym wektorem strumienia wirnika.

Przedstawiona metoda diagnostyczna ma dwa ograniczenia. Po pierwsze diagnostyka wirnika nie jest możliwa dla momentu obciążenia bliskiego zeru. Po drugie, wielkość zmian sygnałów diagnostycznych zmniejsza się przy małych prędkościach.

W przyszłych badaniach planuje się analizę porównawczą możliwości wykorzystania w diagnostyce SI różnych sygnałów struktury wewnętrznej oraz analizę działania metody diagnostycznej w przypadku innych rodzajów uszkodzeń SI.



Rys.8. Napięcie sterujące  $u_{sy}^{ref}$  dla prędkości  $\omega_m=1$  przy  $N_{bb}=2$  oraz zmianie obciążenia i stanu uzwojenia: a) przebieg sygnału, b) przebieg amplitudy harmonicznej  $f_{sh}$ , c) przebieg amplitudy harmonicznej  $f_{rb}$

Prace zostały sfinansowane w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki (NCN) w ramach grantu nr 2013/09/B/ST7/04199 (2014-2017).

## Załącznik

Tabela 1. Dane znamionowe badanego silnika

Nazwa	Symbol	Jednostki fizyczne	Jednostki względne [p.u.]
Moc	$P_N$	1500 [W]	0.621
Prędkość obrotowa	$n_N$	1410 [r/min]	0.94
Napięcie fazowe stojana	$U_{sN}$	230 [V]	0.707
Prąd stojana	$I_{sN}$	3.5 [A]	0.707
Częstotliwość	$f_{sN}$	50 [Hz]	1
Liczba prętów wirnika	$N_r$	26 [-]	[-]
Liczba zwojów stojana	$N_s$	312 [-]	[-]
Rezystancja uzwojenia stojana	$R_s$	5.307 [ $\Omega$ ]	0.081
Rezystancja wirnika	$R_r$	4.843 [ $\Omega$ ]	0.074
Indukcyjność główna	$L_m$	278.5 [mH]	1.331
Indukcyjność rozproszenia stojana	$L_{s\sigma}$	17.3 [mH]	0.083
Indukcyjność rozproszenia wirnika	$L_{r\sigma}$	17.3 [mH]	0.083

**Autorzy:** dr inż. Marcin Wolkiewicz, Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, E-mail: marcin.wolkiewicz@pwr.edu.pl; dr inż. Grzegorz Tarchała, Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, E-mail: grzegorz.tarchala@pwr.edu.pl

## LITERATURA

- [1] Kowalski C.T., Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji, Oficyna wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, Wrocław (2013)
- [2] Riera-Guasp M., Antonino-Daviu J. A., Capolino G.-A., Advances in electrical machine, power electronic, and drive condition monitoring and fault detection: State of the art, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 62 (2015), n.3, 1746–1759
- [3] Ewert P., Use of axial flux in the detection of electrical faults in induction motors, International Symposium on Electrical Machines, (2017), 1-6
- [4] Wolkiewicz M., Tarchała G.J., Orłowska-Kowalska T., Kowalski C.T., Online stator interturn short circuits monitoring in the DFOC induction-motor drive, *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, 63 (2016), n.4, 2517-2528
- [5] Dybkowski M., Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do diagnostyki wirnika silnika indukcyjnego w układzie sterowania polowo-zorientowanego, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wroclawskiej. Studia i Materiały*, (2014), n.34, 37-47
- [6] Wolkiewicz M., Tarchała G.J., Kowalski C.T., Stator windings condition diagnosis of voltage inverter-fed induction motor in open and closed-loop control structures, *Archives of Electrical Engineering*, 64 (2015), n.1, 67-79
- [7] Bellini A., Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C., Closed-loop control impact on the diagnosis of induction motors faults, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 36 (200), n.5, 1318–1329
- [8] Concarì C., Franceschini G., Tassoni C., Rotor fault detection in closed loop induction motors drives by electric signal analysis, 18th Intern. Conference on Electrical Machines, (2008), 1 - 6