

Wykrywanie niewspółosiowości w układach napędowych z silnikiem indukcyjnym zasilanym z przemiennika częstotliwości

Streszczenie. W pracy skupiono się na problemie niewyosowania układów napędowych z silnikiem indukcyjnym. Przedstawiono wybrane metody wykrywania niewspółosiowości oparte na analizie prądu stojana, drgań mechanicznych i modułu wektora przestrzennego prądu stojana. Zaprezentowano zdjęcia z kamery termowizyjnej pokazujące wpływ niewyosowania na elementy konstrukcyjne układu napędowego. Badania laboratoryjne przeprowadzono na silniku indukcyjnym małej mocy. Zaprezentowane wyniki zostały podsumowane uwagami i wnioskami końcowymi.

Abstract. The study is focused on the problem of a misalignment of drive systems with induction motor. The paper presents selected methods of detecting misalignment based on the analysis of: stator current, mechanical vibrations and space vector module of the stator current. Pictures from a thermal imaging camera, showing the impact of the misalignment on components of the drive system, are presented. Laboratory tests were carried out on the low-power induction motor. Comments and the final conclusions summarize presented results. **(Detecting of misalignment of the drive systems with induction motor supplied by a frequency converter).**

Słowa kluczowe: niewyosowanie, monitorowanie, silnik indukcyjny.

Keywords: misalignment, monitoring, induction motor.

Wstęp

Obecnie w przemyśle obserwuje się znaczący wzrost wykorzystania przemienników częstotliwości do zasilania silników indukcyjnych. Tego typu rozwiązania zwiększają możliwości sterowania napędem jak również podnoszą sprawność zasilanych maszyn asynchronicznych, które z uwagi na swoją prostą konstrukcję, niską cenę oraz stosunkowo wysoką niezawodność stanowią ponad 90 % wykorzystywanych maszyn elektrycznych [1]. Niestety nieplanowane remonty oraz związane z nimi przestoje przynoszą duże straty ekonomiczne. Dlatego tak ważne jest wykorzystywanie nowoczesnych systemów monitorowania i diagnostyki uszkodzeń, które umożliwiają już we wczesnej fazie wykrycie uszkodzenia.

Głównymi przyczynami występowania uszkodzeń mechanicznych w maszynach elektrycznych są: awarie łożysk, niewyważenie wirnika silnika, niewłaściwe połączenie maszyny roboczej z silnikiem, czyli niewyosowanie oraz ekscentryczność wirnika. Jeżeli rozważania dotyczą silników indukcyjnych, to ponad 50 % przedwczesnych uszkodzeń jest spowodowanych niepoprawnym wyosowaniem [2]. W przypadku, gdy maszyna pracuje w okresie całodobowym, nawet niewielkie odchylenia od współosiowości mogą spowodować poważne awarie. Nieprawidłowe wyosowanie niekorzystnie wpływa między innymi na łożyska, sprzęgła oraz wały układów napędowych oraz zwiększa straty energii.

Niewspółosiowość układu napędowego z silnikiem indukcyjnym

Obecnie dostępne są na rynku systemy umożliwiające osiowanie niepracującego układu napędowego, jednak wykrycie niewyosowania podczas jego pracy jest trudne. Jedynym sposobem oceny niewspółosiowości układu jest pomiar wtórnych efektów nierównoważonych sił, które wówczas powstają. Najczęściej do wykrywania nieosiowości wykorzystuje się pomiar i analizę prądu stojana oraz drgań mechanicznych. Pomiar tych sygnałów diagnostycznych jest nieinwazyjny a ich analiza uwidacznia wszystkie nieprawidłowe zjawiska zachodzące w maszynie. Coraz częściej w przemyśle wykorzystuje się kamery termowizyjne lub pirometry do rejestracji zmian temperatury informujących o stanie danego elementu (np. łożyska) lub całej maszyny. Niewyosowanie napędu jest dobrze widoczne na zdjęciach w podczerwieni. Niestety duża bezwładność cieplna opóźnia pojawienie się symptomu uszkodzenia i awaria jest najczęściej wykrywana w

momencie krytycznego uszkodzenia maszyny. Zastosowanie termopar i termistorów do pomiaru temperatury wewnątrz maszyny cechuje się niedogodnością związaną z wzajemnym oddziaływaniem układu pomiarowego na obiekt oraz odwrotnie. Problematiczne jest również opracowanie algorytmu detekcji awarii, ponieważ trzeba go najczęściej oprzeć o przepisy, normy lub wiedzę operatora.

Tabela 1. Zestawienie charakterystycznych dla nieosiowości kątowej lub równoległej częstotliwości występujących w widmach prądu stojana, modułu wektora przestrzennego prądu stojana oraz drgań mechanicznych

Sygnał diagnostyczny		
Prąd stojana	Moduł wektora przestrzennego prądu stojana	Drgania mechaniczne
$f_s \pm kf_r$	kf_r	kf_r
f_s – częstotliwość napięcia zasilającego, f_r – częstotliwość rotacyjna, $k=1, 2, 3, \dots$		

Monitorowanie uszkodzeń mechanicznych silnika indukcyjnego oparte na analizie widm prądu stojana oraz drgań mechanicznych polega na obserwacji amplitud określonych charakterystycznych częstotliwości. W tabeli 1 zestawiono charakterystyczne częstotliwości dla niewspółosiowości układu napędowego z silnikiem indukcyjnym widoczne w widmach: prądu stojana, modułu wektora przestrzennego prądu stojana oraz drgań mechanicznych maszyny [2-8].

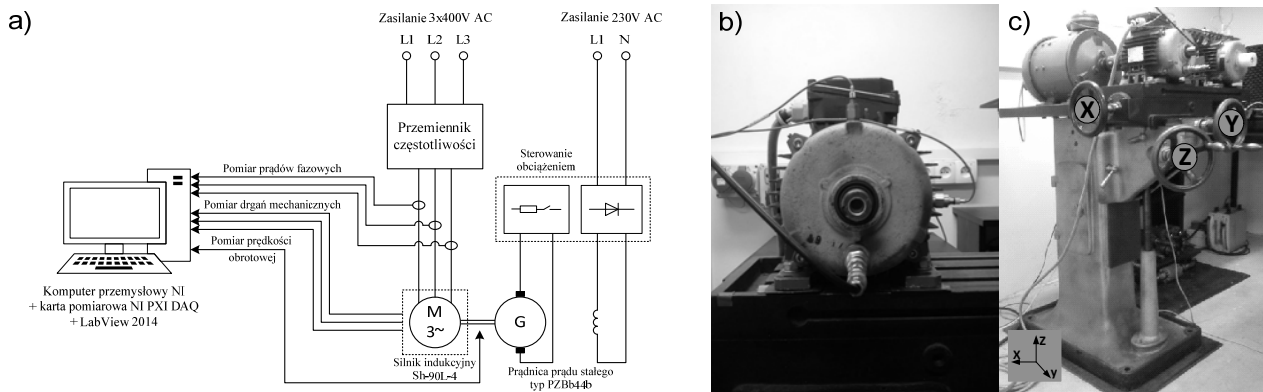
Metodyka badań

Badania eksperymentalne przeprowadzono na silniku indukcyjnym małej mocy 1,5 kW typu Sh-90L-4 sprzęgniętym z prądnicą prądu stałego (moc 1,5 kW) typu PZB b44b. Silnik zasilany był z przemiennika częstotliwości ze sterowaniem skalarnym $U/f=\text{const}$. Układ napędowy umieszczony był na stanowisku umożliwiającym kontrolowane ustawienie niewspółosiowości poprzez regulację położenia silnika względem prądnicy w trzech kierunkach (rys. 1c). Do pomiaru poziomu niewyosowania wykorzystano system laserowo-optyczny OPTALIGN typu ALI 12.00.

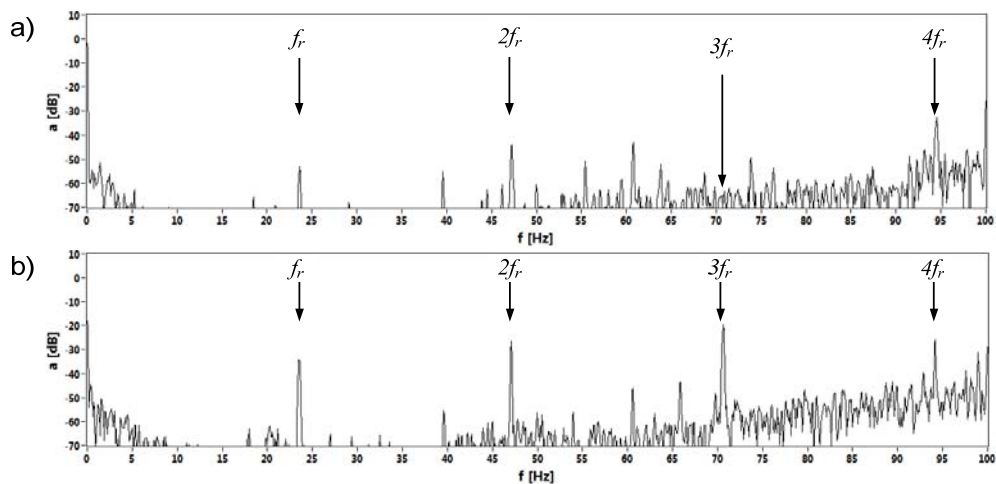
Wykrywanie niewyosowania badanego układu napędowego oparto na analizie prądu stojana oraz drgań mechanicznych. Do pomiaru prądów fazowych wykorzystano przetworniki pomiarowe LEM natomiast pomiar drgań odbywał się za pośrednictwem trzech jednoosiowych czujników przyspieszenia drgań

mechanicznych. Dwa miniaturowe akcelerometry (DeltaTron typ 4514) zostały zamocowane na przyklejonych gwintowanych podstawkach tak, aby ich osie przecinały się pod kątem prostym. Trzeci z czujników (typ M622B01) został zamontowany na pokrywie silnika za pomocą uchwytu magnetycznego (rys. 1b). Badania zrealizowano na komputerze przemysłowym wyposażonym w kartę

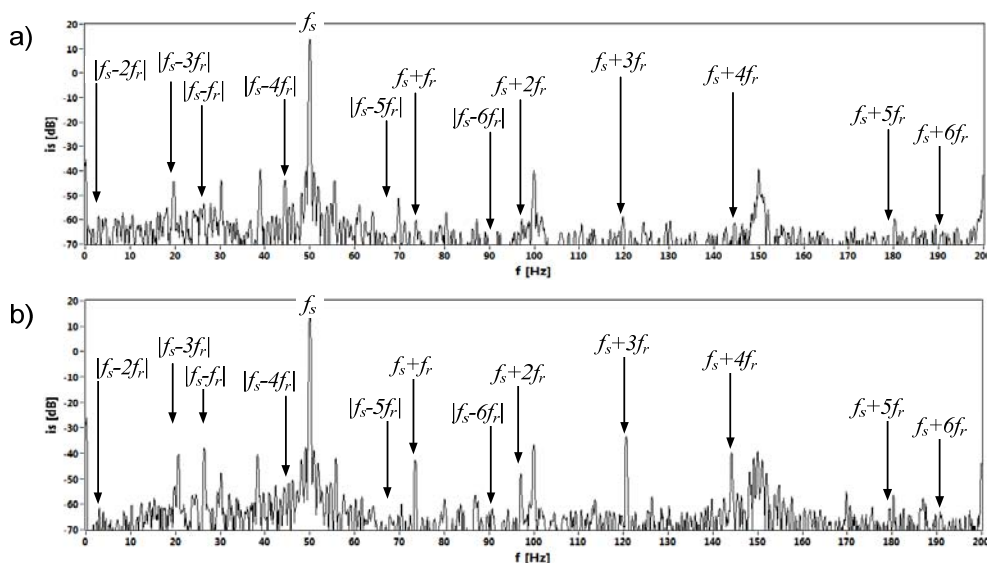
pomiarową NI PXI-4472. Sygnały diagnostyczne mierzone z częstotliwością 8 kHz przez 10 s. Aplikacja do badań została zrealizowana w środowisku LabVIEW 2014. Schemat układu pomiarowego został przedstawiony na rysunku 1a.



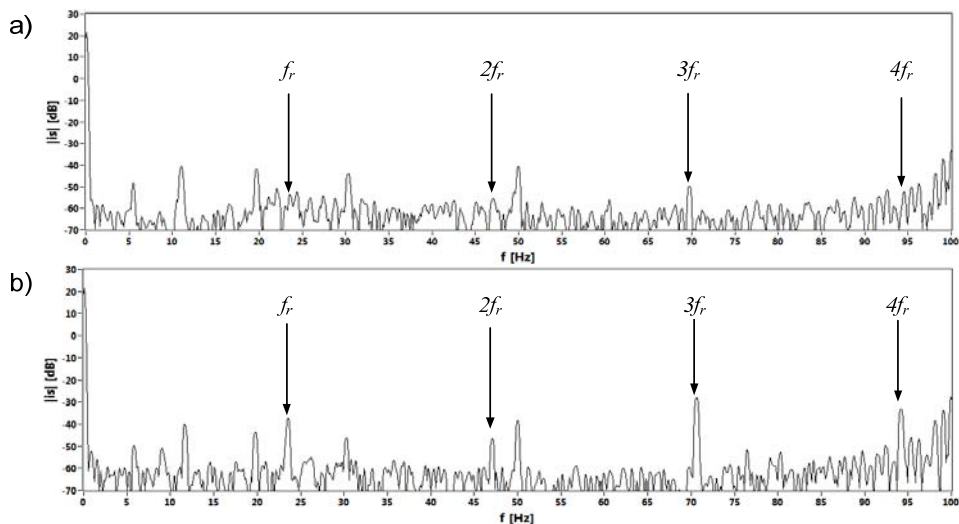
Rys. 1. Stanowisko laboratoryjne: a) schemat układu pomiarowego, b) zdjęcie rozmieszczenia czujników przyspieszenia drgań mechanicznych, c) zdjęcie stanowiska umożliwiającego regulację położenia silnika w trzech osiach względem prądu



Rys. 2. Przykładowe widma drgań mechanicznych w kierunku promieniowym dla częstotliwości zasilania równej 50 Hz oraz silnika obciążonego momentem znamionowym: a) układ wyosiowany, b) poziome przesunięcie równoległe wzdłuż osi x o 0,70 mm



Rys. 3. Przykładowe widma prądu stojana dla częstotliwości zasilania równej 50 Hz oraz silnika obciążonego momentem znamionowym: a) układ wyosiowany, b) poziome przesunięcie równoległe wzdłuż osi x o 0,70 mm



Rys. 4. Przykładowe widma modułu wektora przestrzennego prądu stojana dla częstotliwości zasilania równej 50 Hz oraz silnika obciążonego momentem znamionowym: a) układ wyosiowany, b) poziome przesunięcie równoległe wzdłuż osi x o 0,70 mm

Analiza widmowa drgań mechanicznych, prądu stojana oraz modułu wektora przestrzennego prądu stojana

Podstawową metodą wykrywania uszkodzeń w układach napędowych z silnikiem indukcyjnym jest analiza widmowa sygnałów diagnostycznych. Zamieszczone widma zarejestrowano dla silnika zasilanego napięciem 50 Hz i pracującego pod obciążeniem znamionowym. W celu ułatwienia analizy prezentowanych widm strzałkami zaznaczono charakterystyczne częstotliwości.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe widma drgań mechanicznych układu wyosiwanego oraz z poziomym przesunięciem równoległym wzdłuż osi x o 0,7 mm. Można zauważyć, że dla niewyosiwanego układu napędowego amplitudy poszczególnych charakterystycznych częstotliwości wyraźnie rosną.

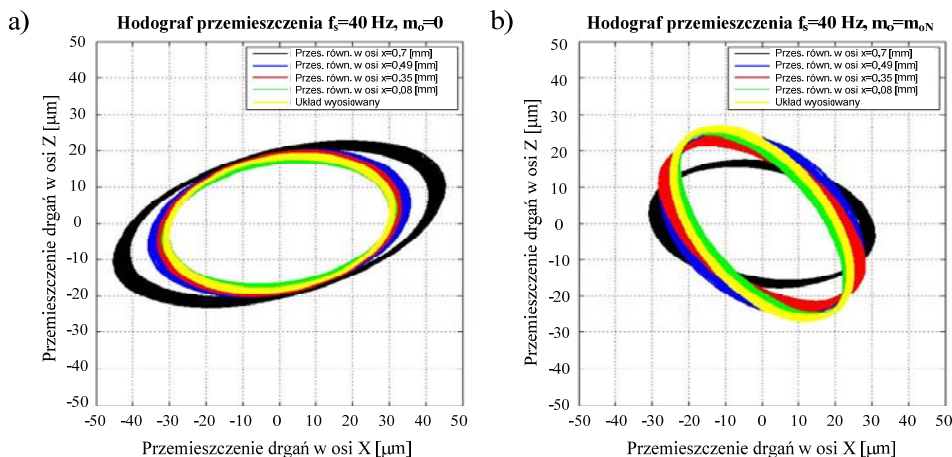
Na rysunku 3 przedstawiono wpływ niewyosiowania na widmo prądu stojana natomiast na rysunku 4 zmiany obserwowane w widmie modułu wektora przestrzennego prądu stojana. Analogicznie jak w przypadku drgań mechanicznych, w analizowanych widmach prądu można zaobserwować, że wraz ze wzrostem stopnia niewspółosiowości układu napędowego rosną amplitudy poszczególnych charakterystycznych częstotliwości.

rysunkach zmiany położenia są mierzone w mikrometrach. Aby wyznaczyć hodograf należy umieścić czujniki na obudowie silnika tak, aby ich osie przecinały się idealnie pod kątem prostym na środku wirnika. W badaniach wykorzystano czujniki przyspieszenia drgań, lecz po podwójnym całkowaniu sygnałów z akcelerometrów uzyskano przemieszczenia drgań mechanicznych w osi x oraz z (rys. 1c). Na rysunku 5 przedstawiono hodografy dla przesunięcia równoległego w osi x silnika zasilanego napięciem o częstotliwości 40 Hz pracującego bez obciążenia oraz pod obciążeniem znamionowym.

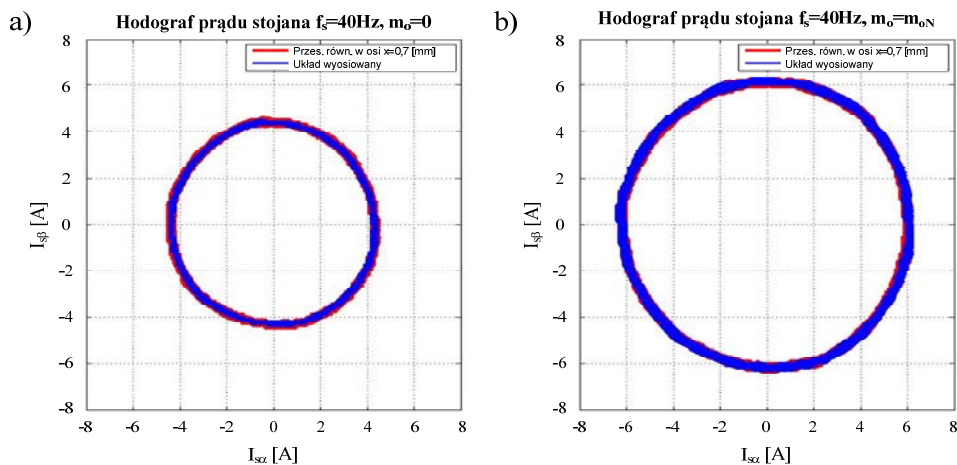
Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że w przypadku braku obciążenia wraz ze wzrostem przesunięcia równoległego wzdłuż osi x rośnie również amplituda drgań w tym kierunku (zmiana kształtu hodografu). W przypadku pracy silnika ze znamionowym momentem obciążenia obserwuje się również zmiany amplitudy drgań w osi z. Stan techniczny prądnicy nie był weryfikowany przed badaniami i można przypuszczać, że posiada ona jakieś niewielkie uszkodzenia mechaniczne (np. wyeksploatowane łożyska). W pracy [8] przedstawiono hodografy uzyskane dla silnika zasilanego napięciem o częstotliwości 30 oraz 50 Hz.

Hodograf przemieszczenia drgań mechanicznych

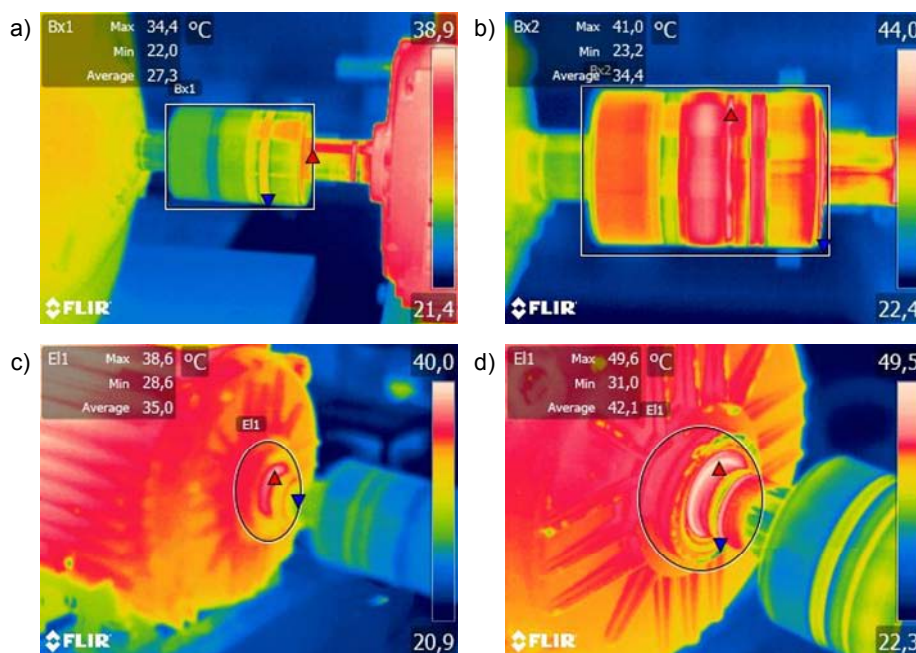
Hodograf przemieszczenia drgań obrazuje, jak wirnik zmienia swoje położenie w stojanie. Widoczne na



Rys. 5. Wpływ równoległego przesunięcia wzdłuż osi x na kształt hodografów przemieszczenia drgań mechanicznych silnika zasilanego napięciem o częstotliwości 40 Hz pracującego: a) bez obciążenia, b) pod obciążeniem znamionowym



Rys. 6. Wpływ równoległego przesunięcia wzdłuż osi x na kształt hodografu prądu stojana silnika zasilanego napięciem o częstotliwości 40 Hz pracującego: a) bez obciążenia, b) pod obciążeniem znamionowym



Rys. 7. Termografy sprężła oraz łożyska silnika napędowego: a) i c) układu wyosiwanego, b) i d) niewyosiwanego (poziome przesunięcie równoległe o 0,76 mm)

Na podstawie przeprowadzonych badań można rozważyć wykorzystanie hodografu przemieszczenia drgań mechanicznych, jako dodatkowego sygnału w procesie monitorowania oraz diagnostyki niewspółosiowości układu napędowego z silnikiem indukcyjnym zasilanym z przemiennika częstotliwości.

Hodograf prądu stojana

W badaniach laboratoryjnych zarejestrowano trzy prądy fazowe. Po ich przekształceniu za pośrednictwem transformacji Clarka–Parka na składowe wirtualne prądy i_{sx} oraz $i_{s\beta}$ i wykreśleniu zmian $i_{s\alpha} = f(i_{s\beta})$ uzyskano hodograf prądu stojana [1]. W przypadku nieuszkodzonego silnika oraz symetrycznego zasilania hodograf powinien mieć kształt okręgu. Powstające w silniku uszkodzenia powodują różne zmiany kształtu hodografu.

Na rysunku 6 przedstawiono wpływ przesunięcia równoległego wzdłuż osi x na kształt hodografu prądu stojana. Niezależnie od stopnia obciążenia silnika niewyosiowanie powoduje deformację trajektorii wektora

prądu stojana. Można to zaobserwować charakterystycznym zwiększeniem się szerokości hodografu – kolor czerwony. W pracy [8] przedstawiono hodografy uzyskane dla silnika zasilanego napięciem o częstotliwości 30 oraz 50 Hz.

W przypadku monitorowania niewspółosiowości układu napędowego z silnikiem indukcyjnym hodograf prądu stojana może również posłużyć jako dodatkowa informacja diagnostyczna.

Badania ciepłe

Coraz częściej działy utrzymania ruchu w przemyśle zostają wyposażone w sprzęt umożliwiający bezstykową metodę pomiaru temperatury. Do podstawowych urządzeń tego typu można zaliczyć: pirometry (pomiar promieniowania całkowitego lub częściowego) oraz kamery termowizyjne (obrazujące widmo promieniowania elektromagnetycznego w zakresie podczerwieni). Kamera termowizyjna rejestruje emitowane przez badany obiekt promieniowanie podczerwone a następnie przetwarza je na

barwną mapę temperatur wyświetlaną na ekranie urządzenia [9]. Użytkownik może w zależności od potrzeb indywidualnie wybierać skalę barw oraz odpowiadające im temperatury. Przedstawione na rysunku 7 zdjęcia charakteryzują się tym, że temperaturom najniższym przyporządkowane są odcienie koloru niebieskiego, a najwyższym czerwone przechodzące w biały. Regularne kontrolowanie termografów badanych układów napędowych pozwala na stosunkowo wczesne wykrycie awarii silnika.

Na rysunku 7 przedstawiono termografy wykonane kamerą termowizyjną wyosiowanego układu napędowego oraz z poziomym przesunięciem równoległym o 0,76 mm. Zdjęcia zostały wykonane kamerą termowizyjną model T365 po około 20 minutowej pracy układu napędowego. Można zauważyć wyraźny wzrost średniej oraz maksymalnej temperatury sprzęgła w przypadku występowania niewyosiowania (rys. 7a i 7b). Ponadto niewyosiowanie niekorzystnie wpływa na pracę łożysk tocznych, których temperatura również wyraźnie wzrosła (rys. 7c i 7d).

Podsumowanie

W pracy skupiono się na przedstawieniu tylko wybranych wyników badań laboratoryjnych. Na ich podstawie można sformułować następujące uwagi i wnioski końcowe:

- analiza widmowa drgań mechanicznych, prądu stojana oraz modułu wektora przestrzennego prądu stojana umożliwia monitorowanie i diagnostykę niewyosiowania układu napędowego z silnikiem indukcyjnym zasilanym z przemiennika częstotliwości,
- dodatkowych symptomów niewyosiowania można poszukiwać w kształcie hodografu przemieszczenia drgań mechanicznych,
- stopień niewspółosiowości układu napędowego wpływa na kształt hodografu prądu stojana powodując deformację trajektorii wektora przestrzennego prądu stojana,
- termografy mogą posłużyć do wykrycia niewspółosiowości układu napędowego,
- zasilanie silnika z przemiennika częstotliwości ze sterowaniem skalarnym utrudnia proces monitorowania i diagnostyki niewyosiowania, jednak nie czyni go niemożliwym.

Autorzy: dr inż. Paweł Ewert, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, E-mail: pawel.ewert@pwr.edu.pl; mgr inż. Marcin Musiał, Politechnika Wrocławska

LITERATURA

- [1] Kowalski C.T., Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2013
- [2] Ewert P., Kowalski C.T., Monitorowanie nieosiowości napędów elektrycznych z silnikami indukcyjnymi, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, Nr 63, 2009, 267–275
- [3] Bossio J.M., Bossio G.R., De Angelo C.H., Angular Misalignment in Induction Motors With Flexible Coupling, *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, IECON '09.*, 2009, 1033–1038
- [4] Fatemi J.R., J., Henao H., Capolino G–A., Sieg–Zieba S., Load Influence on Induction Machine Torque and Stator Current in Case of Shaft Misalignment, *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, IECON '09*, 2009, 3449–3454
- [5] Karim B.A., Slimane B., Elias H. A., Nadir B., Samir K., Investigation on the diagnosis of simple and combines mechanical faults in asynchronous motor based electric drives, *American Journal of Applied Sciences* 11, 2014, 994–1004
- [6] Martinez–Morales J.D., Palacios E., Campos–Delgado D. U., Data Fusion for Multiple Mechanical Fault Diagnosis in Induction Motors at Variable Operating Conditions, *7th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE)*, 2010, 176–181
- [7] Obaid R.R., Habetler T.G., Tallam R. M., Detecting Load Unbalance and Shaft Misalignment Using Stator Current in Inverter–Driven Induction Motors, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03*, vol. 3, 2003, 1454–1458
- [8] Ewert P., Musiał M., Wybrane metody monitorowania niewyosiowania układu napędowego z silnikiem indukcyjnym, *LII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME* 2016, 339–349
- [9] Gabrysiak R., Kamery termowizyjne w diagnostyce maszyn i urządzeń, *artykuł ze strony Elektroinstalator, www.elektroinstalator.com.pl*, 2013