

**Mirosław Czechowski, Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne S.A. Kraków,
Politechnika Krakowska, Kraków**
**Maciej Sułowicz, Jakub Zielonka, Jarosław Tulicki, Michał Stradowski,
Politechnika Krakowska, Kraków**

SYSTEM DO CIĄGŁEJ DIAGNOSTYKI SILNIKÓW INDUKCYJNYCH KLATKOWYCH PRACUJĄCYCH W UKŁADACH NAPĘDOWYCH WAGONÓW TRAMWAJOWYCH

SYSTEM FOR CONTINUOUS DIAGNOSTICS OF SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTORS OPERATING IN THE DRIVE SYSTEMS OF TRAM CARS

Streszczenie: W artykule przedstawiono koncepcję budowy i sposób realizacji systemu diagnostycznego do oceny stanu silników indukcyjnych pracujących w układach napędowych wózków wagonów tramwajowych. Przedstawiono najważniejsze założenie, które należy przyjąć przy projektowaniu i zestawieniu układu pomiarowego oraz doborze skutecznych metod diagnostycznych do wykrywania uszkodzeń elektrycznych i mechanicznych w układzie napędowym tramwaju. Przedstawiono opis układu pomiarowego oraz sygnały, które są wykorzystywane w module diagnostycznym. Na bazie doczasowych doświadczeń autorów wybrano metody diagnostyczne, które poprzez analizę sygnałów prądów, napięć i prędkości w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej pozwolą na skuteczne wykrywanie uszkodzeń w stanach dynamicznej pracy napędu. Reprezentatywną grupą metod diagnostycznych przedstawioną w artykule jest metoda analizy spektrogramu kurtozy. Podjęte prace są związane z poszukiwaniem nowych skutecznych metod diagnostycznych do wykrywania uszkodzeń natury elektrycznej i mechanicznej występujących w układach napędowych wagonów tramwajowych.

Abstract: The article presents the concept of construction and the implementation method of a diagnostic system for the assessment of the condition of induction motors operating in the drive systems of trolley carriages. The most important assumption that should be made when designing and setting up the measurement system and selection of effective diagnostic methods for detecting electrical and mechanical damage in the tram drive system was presented. A description of the measuring system and signals used in the diagnostic module are presented. Based on the authors' past experiences, diagnostic methods have been selected which, by analyzing the signals of currents, voltages and speeds in the time-frequency domain, will allow for effective detection of failures in the states of dynamic operation of the drive. A representative group of diagnostic methods presented in the article is the method of kurtosis spectrogram analysis. The work undertaken is related to the search for new, effective diagnostic methods to detect electrical and mechanical damage occurring in the drive systems of tram cars.

Słowa kluczowe: diagnostyka uszkodzeń, układ napędowy tramwaju, uszkodzenia elektryczne, uszkodzenia mechaniczne, monitoring, metody diagnostyki, silnik indukcyjny, wagon tramwajowy, kurtoza, kurtogram

Keywords: damage diagnostics, tram drive system, electrical faults, mechanical faults, monitoring, diagnostic methods, induction motor, tram wagon, kurtosis, kurtogram

1. Wstęp

Nowoczesne układy napędowe wagonów tramwajowych eksploatowanych w przedsiębiorstwach komunikacyjnych w Polsce, w większości przypadków są oparte na rozwiązaniach z silnikami indukcyjnymi klatkowymi zasilanymi z przemienników częstotliwości.

Jazda tramwaju podczas transportu pasażerów to ciągła zmiana charakteru jazdy wynikająca z aktualnych warunków ruchu ulicznego, ukształtowania terenu oraz rozkładu jazdy określonego pojazdu będącego na linii komunikacyjnej.

Aktualnie wymaga się, żeby przejazd tramwaju odbywał się bez zakłóceń i zatrzymań na linii komunikacyjnej. Bardzo ważnym zadaniem jest więc zwrócenie uwagi na niezawodną pracę układu napędowego i zwrócenie uwagi na silniki napędzające poszczególne osie pojazdu oraz układy przeniesienia napędu.

Diagnostyka napędu wagonu tramwajowego będącego w ruchu podczas normalnego zadania transportowego jest zadaniem trudnym. Symptomy powstających uszkodzeń możliwe do wydobycia z mierzonych sygnałów są często zakłócone przez ciągły ruch pojazdu oraz dodatkowe

czynniki zewnętrzne, takie choćby jak drgania całego pojazdu wywołane nierównomiernością podłoża i zmianami ukształtowania terenu.

Rozpoczęte w 2016 roku, pilotażowe badania napędów wagonów tramwajowych przez autorów [11-12], [14-15], [18-21] dały obiecujące wyniki co do możliwości opracowania systemu do ciągłego monitorowania silników jak i całego układu przeniesienia napędu podczas normalnej jazdy wagonu w ruchu pasażerskim.

Głównym celem dalszych prac jest opracowanie skutecznych metod diagnostycznych do bezinwazyjnej oceny stanu elementów napędów wagonów tramwajowych umożliwiającego w sposób ciągły diagnozowanie stanu napędu poprzez pomiar niezbędnych sygnałów diagnostycznych. Główne dwa założenia jakie postawiono przy rozwiązaniu tego problemu to:

- W oparciu o dodatkowe pomiary sygnałów prądów i napięć zasilających oraz sygnał prędkości z istniejącego systemu pomiarowego możliwe jest skuteczne diagnozowanie uszkodzeń elektrycznych i mechanicznych napędów wagonu tramwajowego.
- Aktualnie eksploatowane i nowe modele wagonów tramwajowych powinny zostać wyposażone w dodatkowy system umożliwiający bieżącą kontrolę stanu i wczesne sygnalizowanie złego stanu maszyn napędowych.

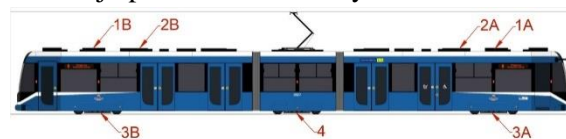
Liczne przykłady stosowania metod diagnostycznych dla napędów elektrycznych w trakcie ich normalnej pracy w różnych gałęziach przemysłu [1-2], [6-10], [13], [16-17] przemawiają za podjęciem się wyzwania opracowanie systemu diagnostycznego dla napędów wagonów tramwajowych podczas normalnej jazdy wagonu. Bazując na pomiarze prądów i napięć zasilających oraz sygnałach prędkości podjęto próby wybrania najbardziej skutecznych metod diagnostycznych, które mogą dostarczyć najbardziej wiarygodnych i jednoznacznych symptomów do oceny silnika i poszczególnych elementów układu przeniesienia napędu.

W zakresie opracowania metod diagnostycznych dla napędów wagonów tramwajowych główne wyzwania to diagnostyka pracy tych napędów przy zmiennym obciążeniu, zmiennej prędkości obrotowej i zmiennej częstotliwości zasilania z przetwornicy częstotliwości. W zdecydowanej większości czasu pracy takiego napędu mamy do czynienia ze stanami dynamicznymi. Są to stany pracy napędu, dla których wiarygodna diagno-

styka jest zadaniem trudnym. Z drugiej strony te stany pracy napędu pozwalają tylko wtedy, w odpowiednio analizowanych sygnałach, znaleźć charakterystyczne cechy, które będą nieść cenne informacje diagnostyczne. Stosując metody analizy czasowo-częstotliwościowej czy częstotliwościowej jest możliwe wypracowanie wiarygodnych wskaźników do oceny diagnostycznej [3-6]. Syntetyczne zestawienia dla zaproponowanych wskaźników oceny może pozwolić na odnalezienie zależności, jak z upływem czasu eksploatacji maszyn i elementów pracujących w układach napędowych zmieniają się wartości tych wskaźników. W literaturze światowej nie ma zasadniczo opisu systemu diagnostycznego, dla którego były by podane przepisy na jednoznaczne wskaźniki oceny diagnostycznej dla układów napędowych pracujących przy zmiennym obciążeniu i zmiennej częstotliwości zasilania.

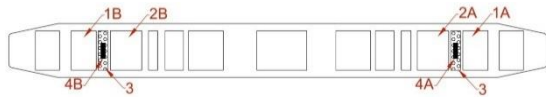
2. System ciągłego monitorowania stanu układu napędowego wagonu tramwajowego

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń i po rozpoznaniu technicznej realizowalności pomiarów na potrzebę implementacji metod oceny stanu przyjęto, że wagony tramwajowe powinny być wyposażone w dodatkowe czujniki pomiarowe. Proponowane do badań rozwiązanie zakłada budowę niezależnego systemu pomiarowo-diagnostycznego, który mógłby się w przyszłości stać integralną częścią opomiarowania wagonów tramwajowych montowaną przez producentów. Schemat ideowy proponowanego rozwiązania, na przykładzie tramwaju Bombardier NGT6 przedstawiono na rys.1 do rys.4. Ten typ tramwaju zawiera łącznie trzy wózki z czego dwa napędowe i jeden wózek toczny. Wózki napędowe wyposażone są w poprzeczne napędy osi, które zapewniają całkowite odprężenie silnika oraz przekładni. Każdy z wózków w układzie napędowym zawiera po dwa silniki indukcyjne trójfazowe. Schemat tramwaju przedstawiono na rys.1.



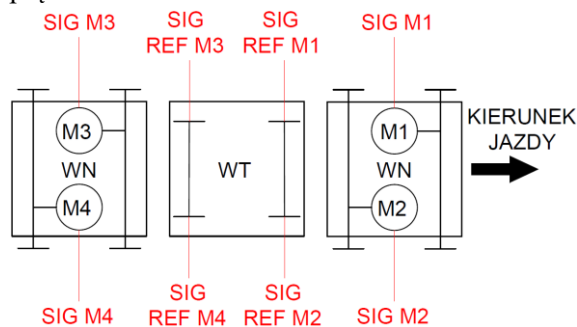
Rys. 1. Schemat tramwaju Bombardier NGT6 – widok boczny (A-elementy napędu przedniego, B- elementy napędu tylnego, 1-rezystory hamowania, 2-konterer z elektroniką, 3-wózki napędowe, 4-wózek toczny). Źródło: Internet

Opracowany system pomiarowy pozwala na monitoring silników indukcyjnych jednego wózka napędowego. Do opomiarowania wszystkich 4 silników potrzebne było by dwa takie układy pomiarowe lub niezbędne jest przekładanie układu pomiarowego z jednego wózka napędowego na drugi. Na rys.2. zobrazowano miejsce montażu systemu pomiarowego.



Rys. 2. Miejsce montażu poszczególnych modułów systemu pomiarowego na tramwaju Bombardier NGT6 – widok górny (A- elementy napędów przedniego, B- elementy napędu tylnego, 1- rezystory hamowania, 2-kontenery z elektroniką, 3-pomost techniczny, 4-miejsce montażu zewnętrznej części systemu pomiarowego)

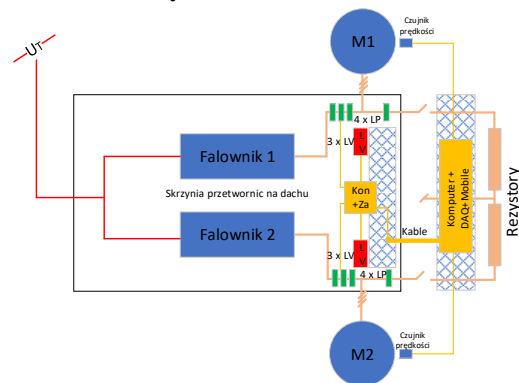
Aparatura pomiarowa została w całości zamontowana na dachu tramwaju, na pomoście technicznym w obudowach hermetycznych wraz z komputerem, kartą pomiarową. Przetwornikami napięciowymi i prądowymi typu LEM, układem zasilania oraz modułem GPRS do transmisji danych. Przetworniki prądowe LEM zostały zamontowane na odpowiednie przewody zasilające silniki a do wejść układów pomiarowych z przetwornikami napięciowymi doprowadzono odpowiednie potencjały napięć poszczególnych faz. Sygnały sterujące prędkością silników oraz sygnał prędkości referencyjnej zostały doprowadzone do układu pomiarowego z cyfrowego układu sterującego. Na rys.3. zobrazowano schemat wyprowadzenia sygnałów prędkości.



Rys. 3. Oznaczenie sygnałów prędkości silników oraz sygnałów referencyjnych (WN – wózek napędowy, WT – wózek toczny)

W koncepcji budowy i pełnej funkcjonalności systemu założono, że będą mierzone i przetwarzane przez system diagnostyczny on-line sygnały: prądów, napięć i prędkości obrotowej silników pracujących w układzie napędowym.

Schemat ideowy opomiarowania wózka przedstawiono na rys.4.



Rys. 4. Schemat ideowy opomiarowania wózka tramwaju na potrzebę ciągłego monitorowania stanu układu napędowego

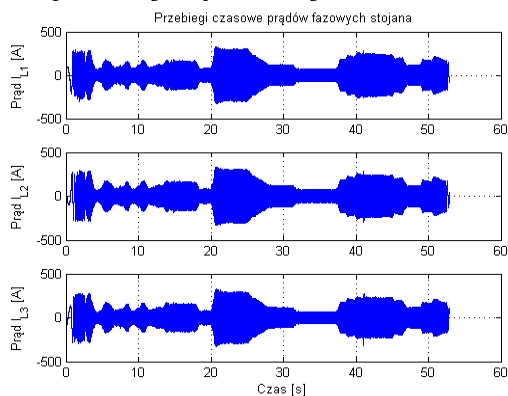
W układzie założono zainstalowanie na zaciskach zasilających każdego z silników (M1, M2) trzech przetworników hallotronowych HV25 typu LEM (LV) do pomiaru napięć fazowych. Do pomiaru prądu w każdej z trzech faz zasilania danego silnika na przewodach zasilających zamontowano hallotronowe przetworniki do pomiaru prądu HST(S)21 (LP) z rozłączanym rdzeniem co bez ingerencji w obwód zasilania pozwoli łatwo zamontować przetwornik na przewodzie zasilającym silnik. Czwarty przetwornik (LP) został zamontowany na przewodzie podłączonym do rezystora dołączanego do zacisków silnika podczas hamowania. Dla dwóch silników zamontowano łącznie 6 przetworników napięciowych (LV) oraz 8 przetworników prądowych (LP). Sygnały z tych czujników doprowadzono do układu kondycjonowania sygnałów i modułu zasilania przetworników (Kon+Za na rys.4.). Sygnały z kondycjonera przewodami sygnałowymi wyprowadzono do hermetycznej obudowy na zewnątrz skrzyni przetwornicy. W tej obudowie umieszczono mini komputer, kartę pomiarową DAQ oraz moduł do komunikacji GPRS (Komputer+Karta pomiarowa -DAQ+-Mobile na rys.4.). W pełnej funkcjonalności układu założono jeszcze połączenie przewodowe sygnału prędkości z obu silników do karty pomiarowej DAQ.

Do ciągłej rejestracji sygnałów przygotowano oprogramowanie w środowisku MATLAB. Wszystkie sygnały podczas badań rejestrowano z częstotliwością 40 kHz. Dzięki modułowi GPRS w każdej chwili istnieje możliwość zdalnego nadzorowania, korygowania i uruchamiania procedur pomiarowych.

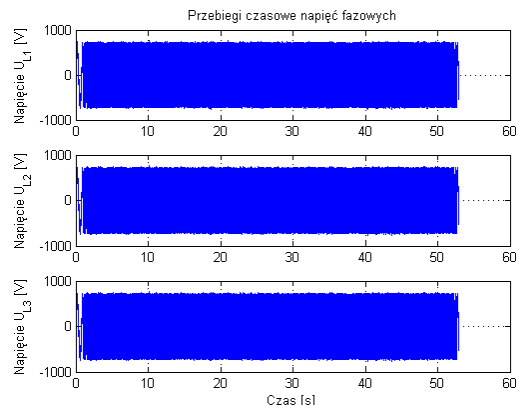
Z założenia system pomiarowy działa bezobsługowo podczas normalnej jazdy tramwaju w ruchu i realizacji zadania przewozu pasażerów. Pierwsze zamontowanie systemu i jego uruchomienie wymaga kilku godzin dostępności do skrzyni przetwornic na dachu tramwaju. Przełożenie systemu do kolejnych przetwornic pokładowych wymaga maksymalnie do dwóch godzin dostępności tramwaju na stanowisku serwisowym Stacji Obsługi Tramwajów w przedsiębiorstwie.

3. Analiza zebranych danych i wybór metody diagnostycznej

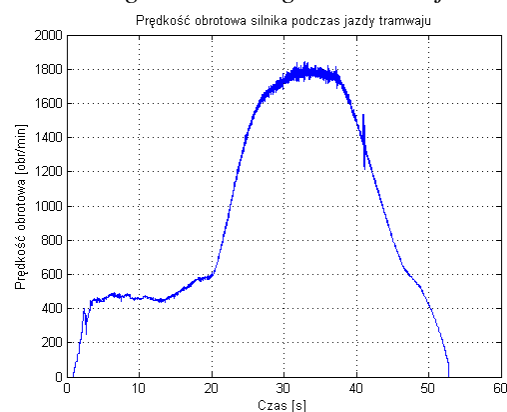
Opisany w poprzednim rozdziale system monitorowania i zbierania danych dla oceny stanu silników indukcyjnych, pracujących w układach napędowych wagonów, pozwala na równoczesny pomiar, dla każdego z tych silników, po 9 sygnałów diagnostycznych prądów, napięć i prędkości obrotowej tych silników oraz prędkości odniesienia. Wszystkie te sygnały są mierzone on-line podczas normalnej jazdy tramwaju. Z obserwacji tych sygnałów przedstawionych na rys.5 do rys.9 możemy zauważyć dużą dynamikę ich zmian w czasie. Zmienność sygnałów determinuje konieczność dobrania właściwych metod diagnostycznych, które pozwolą na analizowanie sygnałów zmieniających się w czasie. Dodatkowo mając na uwadze, przyjęte założenie o potrzebie wykrywania uszkodzeń elektromechanicznych w oparciu o rejestrowane sygnały wybrano metodę opartą na widmie kurtozy i kutrogramie. Jest to metoda dedykowana dla układów ze znaczną dynamiką zmian sygnałów w czasie. Na rys.5. przedstawiono przebiegi trzech prądów fazowych stojana dla badanego silnika. Na rys.6. przebiegi trzech napięć fazowych stojana dla badanego silnika. Na rys.7 natomiast przedstawiono przebieg prędkości obrotowej na wale silnika podczas jazdy tramwaju.



Rys. 5. Przebiegi trzech prądów fazowych stojana dla badanego silnika wagonu tramwaju

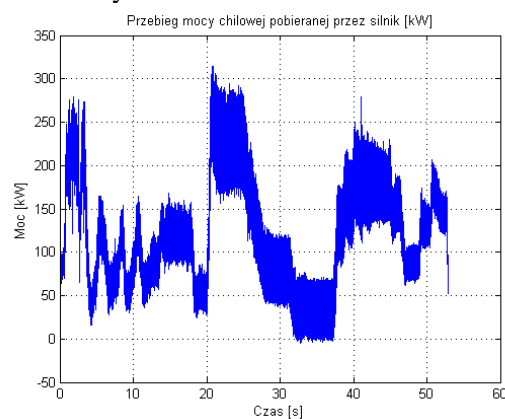


Rys. 6. Przebiegi trzech napięć fazowych stojana dla badanego silnika wagonu tramwaju



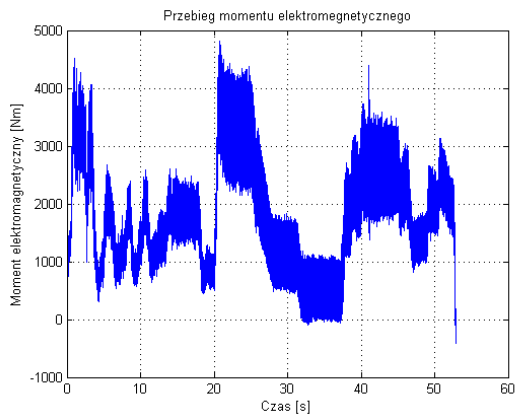
Rys. 7. Przebiegi prędkości obrotowej jednego z silników podczas jazdy wagonu tramwaju

W oparciu o przebiegi trzech prądów i trzech napięć fazowych możemy wyznaczyć przebieg mocy chwilowej pobieranej przez silnik. Przykładowy przebieg mocy chwilowej przedstawiono na rys.8.



Rys. 8. Przebieg mocy chwilowej pobieranej przez silnik w czasie jazdy wagonu tramwaju

Mierząc dodatkowo prędkość obrotową silnika możemy wyznaczyć przebieg momentu elektromagnetycznego. Przykładowy przebieg momentu elektromagnetycznego przedstawiono na rys.9.



Rys. 9. Przebieg momentu elektromagnetycznego podczas jazdy wagonu tramwaju

Przebieg moc chwilowej oraz momentu elektromagnetycznego pozwala na wykrywanie uszkodzeń zarówno elektrycznych w samym silniku jak również uszkodzeń zewnętrznych przeniesienia napędu. Są to cenne sygnały diagnostyczne uzyskane pośrednio poprzez pomiar wymienionych poprzednio sygnałów diagnostycznych prądów, napięć i prędkości.

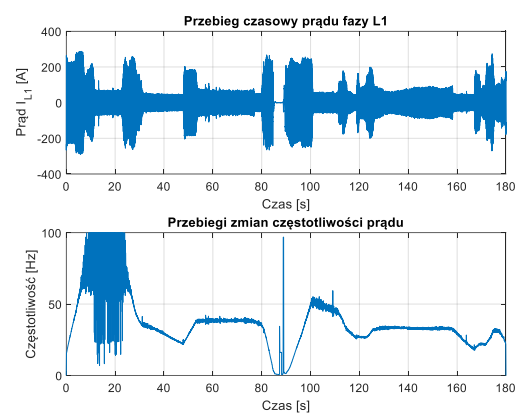
Z obserwacji sygnałów diagnostycznych wynika, że praca silników w napędzie wagonu odbywa się przy zmiennym obciążeniu, zmiennej prędkości obrotowej i zmiennej częstotliwości zasilania z pokładowej przetwornicy częstotliwości.

Z tego względu zdecydowano się na wybór jednej z metod czasowo-częstotliwościowych analizy sygnałów. Wybrano analizę spektrogramu widma kurtozy nazywanego kurtogramem i zaimplementowanego pod tą nazwą w programie MATLAB [3-4].

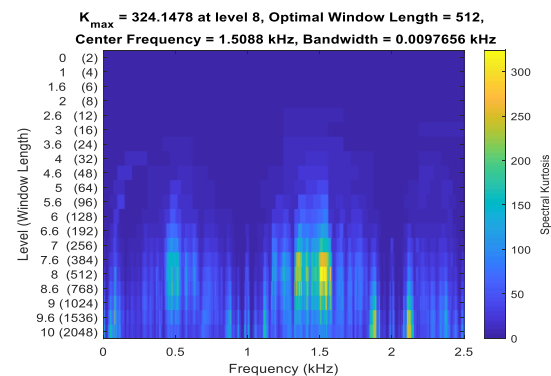
Funkcja kurtogramu zaimplementowana w programie MATLAB zapewnia kluczowe informacje, których można użyć podczas wykonywania analizy widma kurtozy.

Kurtogram oblicza widmo kurtozy dla wielu rozmiarów okien przy użyciu szybkiego algorytmu kurtogramu. Wraz z kurtogramem i powiązany z nim wektorami częstotliwości i okien, kurtogram zwraca optymalny rozmiar okna i inne parametry dostrajania filtra.

Na rys. 10 w części górnej przedstawiono przebieg prądu stojana fazy L1 silnika M1 podczas wybranego odcina jazdy a na części dolnej rysunku zmianę częstotliwości tego prądu w czasie jazdy. Na rys. 11. przedstawiono natomiast kurtogram dla okna o rozmiarze 512.

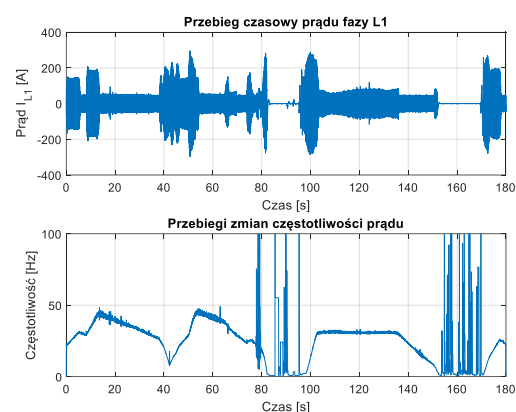


Rys. 10. Przebieg prądu stojana fazy L1 silnika M1 podczas wybranego odcina jazdy (rysunek górny), oraz zmiana częstotliwości prądu w czasie tej jazdy (rysunek dolny)

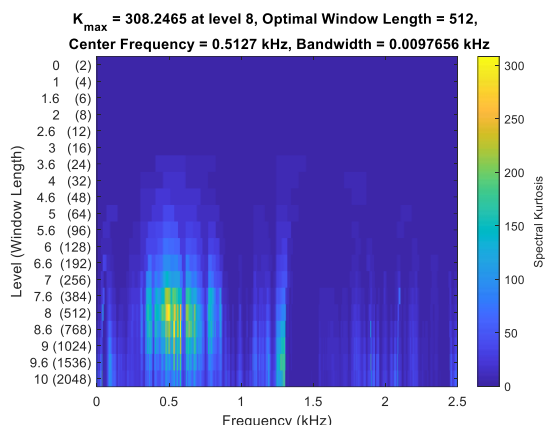


Rys. 11. Wykres kurtogramu dla przebiegu prądu z rys.10, optymalny rozmiar okna 512

Na rys. 12 w części górnej przedstawiono przebieg prądu stojana fazy L1 silnika M2 podczas wybranego odcina jazdy a na części dolnej rysunku zmianę częstotliwości tego prądu w czasie jazdy. Na rys. 13. przedstawiono natomiast kurtogram dla okna o rozmiarze 512.



Rys. 12. Przebieg prądu stojana fazy L1 silnika M2 podczas wybranego odcina jazdy (rysunek górny), oraz zmiana częstotliwości prądu w czasie tej jazdy (rysunek dolny)



Rys. 13. Wykres kurtogramu dla przebiegu prądu z rys.12, optymalny rozmiar okna 512

Algorytm szybkiego kurtogramu wykorzystuje filtrowanie pasmowoprzepustowe wraz z uproszczonymi obliczeniami, aby przybliżyć kurtozę widmową dla każdego rozmiaru okna i częstotliwości, zamiast obliczać krótkotrwałą transformację Fouriera (STFT).

Tak uzyskane kurtogramy będą w dalszej kolejności przetwarzane w systemie celem znalezienia charakterystycznych cechy, które niosą informacje diagnostyczne do wykrycia uszkodzeń w silniku i układzie przeniesienia napędu.

Wstępne analizy potwierdzają możliwość znalezienia charakterystycznych informacji, które można będzie związać ze stanem silnika czy układu przeniesienia napędu.

Procedurę oceny stanu można będzie zoptymalizować stosując sieci neuronowe o uczeniu głębokim czy inne techniki uczenia maszynowego. Wszystkie podjęte prace są związane z poszukiwaniem nowych skutecznych metod diagnostycznych do wykrywania uszkodzeń w układach napędowych wagonów tramwajowych.

4. Wnioski

W artykule opisano koncepcję i realizację systemu pomiarowo-diagnostycznego umożliwiającego ocenę on-line silników napędów wagonów tramwajowych. W oparciu o zbierane i analizowane sygnały diagnostyczne w stanach dynamicznych wyodrębniane są symptomy do wyznaczenia wskaźnika diagnostycznego. W oparciu o wartość wskaźników dokonuje się oceny stan elementów układu napędu wagonu.

Badania napędów wagonów tramwajowych przeprowadzone przez autorów wskazują na potrzebę dalszego rozwoju dedykowanego systemu diagnostycznego i prowadzenia badań diagnostycznych w sposób ciągły, co pozwoliłoby na

wczesne sygnalizowanie powstających uszkodzeń.

Przy wyposażeniu pojazdu na stałe w system do ciągłego monitorowania stanu silników układów napędowych wagonu zadanie związane z oceną diagnostyczną może być prowadzone w dowolnie wybranym momencie w sposób ciągły. Można też uwzględnić podobne warunki pracy układu napędowego. Również procedurę oceny można powtórzyć tyle razy, ile układ napędowy pracuje podczas jazdy wagonu.

Projekt jest próbą wyjścia w kierunku potrzeb przedsiębiorstw komunikacyjnych eksploatujących wagony tramwajowe czy inne pojazdy szynowe. Po pilotażowym uruchomieniu system może zostać wdrożony w innych przedsiębiorstwach komunikacyjnych. Natomiast prototyp systemu może być wdrożony przez polskich i zagranicznych producentów wagonów tramwajowych w nowo budowanych wagonach i może to być podstawowe wyposażenie tych pojazdów. W niedługim czasie wyposażenie pojazdów transportu publicznego, z napędem elektrycznym, w układy automatycznej diagnostyki, może stać się nawet prawnie obowiązkowe.

5. Literatura

- [1]. M. Benbouzid "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, str. 984-993, 2000.
- [2]. W. Rams, J. Rusek "Praktyczna diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych", *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 68, str. 1-5, 2004.
- [3]. J. Antoni "The Spectral Kurtosis: A Useful Tool for Characterising Non-Stationary Signals", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, Issue 2, pp. 282-307, 2006.
- [4]. J. Antoni, R. B. Randall "Fast Computation of the Kurtogram for the Detection of Transient Faults", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, Issue 1, pp. 108-124, 2007.
- [5]. T.J. Zieliński "Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań". *Wydawnictwo Komunikacji i Łączności*, 2007.
- [6]. C.T. Kowalski, W. Kanior "Ocena skuteczności analiz FFT, STFT i falkowej w wykrywaniu uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego", *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, Nr 60, str. 202-211, 2007.
- [7]. A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, G.A. Capolino "Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.55, No.12, str. 4109-4126, Dec. 2008.

- [8]. L. Swędrowski "Pomiary w diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych", *Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej*, 2013.
- [9]. M. Sułowicz, J. Petryna, K. Weinreb, K. Guziec "Porównawcze pomiary defektów klatek rozruchowych silników indukcyjnych pod kątem wykorzystania w diagnostyce", *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 99, s. 77-83, 2013.
- [10]. C.T. Kowalski "Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji", *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, 2013.
- [11]. M. Czechowski "Monitoring i diagnostyka układów napędowych wagonów tramwajowych", *Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Krakowska*, Kraków 2016.
- [12]. M. Czechowski, M. Sułowicz Diagnostyka układów napędowych wagonów tramwajowych, *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 114, str. 197-204, 2017.
- [13]. V. Choqueuse, E. Elbouchikhi, Z. Oubrahim and M. Benbouzid "On the use of phase diversity for spectral estimation in current signature analysis," *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, str. 8093-8098, 2017.
- [14]. M. Czechowski, M. Sułowicz "Propozycja metod diagnostyki układów napędowych wagonów tramwajowych", *Napędy i Sterowanie*, nr 7/8, s. 92-101, 2018.
- [15]. M. Sułowicz, M. Czechowski "Diagnostyka silników indukcyjnych klatkowych w układach napędowych wagonów tramwajowych", *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 119, str. 189-195, 2018.
- [16]. F. Garramiola, J. Poza, P. Madina, J. Del Olmo, G. A. Almandoz "A review in fault diagnosis and health assessment for railway traction drives", *Appl. Sci.*, Vol. 8, No. 2475, pp. 4, 2018.
- [17]. T. Glinka, S. Szymaniec "Diagnostyka maszyn i urządzeń – uwagi ogólne", *Napędy i Sterowanie*, nr 5, str. 36-49, 2020.
- [18]. J. Zielonka "Opracowanie metody i systemu do ciągłej rejestracji sygnałów diagnostycznych na potrzeby oceny stanu silników pracujących w napędach wagonów tramwajowych", *Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Krakowska*, 2021.
- [19]. M. Stradowski "Opracowanie bezinwazyjnej metody diagnozowania uszkodzeń elektrycznych i mechanicznych dla napędów wagonów tramwajowych", *Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Krakowska*, 2021.
- [20]. J. Zielonka, M. Sułowicz, M. Czechowski, "System zbierania danych z czujników zabudowanych w smartfonach na potrzebę monitorowania wybranych parametrów pojazdów z napędem elektrycznym", *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 126, str. 131-135, 2021.
- [21]. Z. Zielonka, M. Sułowicz, M. Czechowski "Analiza możliwości wykorzystania sensorów zabudowanych w smartfonach w systemach diagnostycznych", *Napędy i Sterowanie*, nr 11, s. 70-75, 2021.

Autorzy

mgr inż. Mirosław Czechowski, mczechow@mpk.krakow.pl
 Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne S.A.
 30-347 Kraków, ul. Jana Brożka 3
 mgr inż. Mirosław Czechowski
 miroslaw.czechowski@doktorant.pk.edu.pl
 dr hab. inż. Maciej Sułowicz, prof. PK
 maciej.sulowicz@pk.edu.pl
 mgr inż. Jakub Zielonka
 jakub.zielonka@doktorant.pk.edu.pl
 mgr inż. Jarosław Tulicki
 jaroslaw.tulicki@pk.edu.pl
 mgr inż. Michał Stradowski
 m.stradowski96@gmail.com
 Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii
 Elektrycznej i Komputerowej,
 Katedra Inżynierii Elektrycznej,
 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24

Informacje dodatkowe

Autorzy składają szczególne podziękowania Dyrekcji Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego w Krakowie za zgodę na realizację badań, udostępnienie niezbędnych materiałów i pojazdów do przeprowadzenia badań oraz za nieocenioną pomoc pracowników przedsiębiorstwa w ich realizacji. Przedstawione w artykule wyniki, uzyskano w ramach realizacji trzech prac dyplomowych magisterskich oraz aktualnie kontynuowanych badań w ramach projektu doktoratu wdrożeniowego V edycji pt. *Przybliżenie utrzymania sprawności wagonów tramwajowych w oparciu o bezinwazyjne metody on-line diagnostyki układów napędowych tych pojazdów*, umowa nr DWD/5/0229/2021, finansowanego ze środków Ministerstwa Edukacji i Nauki.