

Maciej Sułowicz, Politechnika Krakowska, Kraków

Mirosław Czechowski, Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne S.A., Kraków

DIAGNOSTYKA SILNIKÓW INDUKCYJNYCH KLATKOWYCH W UKŁADACH NAPĘDOWYCH WAGONÓW TRAMWAJOWYCH

THE DIAGNOSTICS OF CAGE INDUCTION MOTORS IN DRIVE SYSTEMS OF TRAM WAGONS

Streszczenie: W artykule przedstawiono doświadczenia autorów z przeprowadzonych badań diagnostycznych silników indukcyjnych klatkowych napędów wagonów tramwajowych. Badania diagnostyczne przeprowadzono na kilkudziesięciu silnikach pracujących w kilku wagonach tramwajowych w jednym z przedsiębiorstw komunikacyjnych. Pomiary diagnostyczne, z wykorzystaniem cewek Rogowskiego, karty pomiarowej i dedykowanego oprogramowania wykonano w dwóch różnych porach roku. Zebrane dane pomiarowe poddano szczegółowej analizie i dokonano oceny stanu poszczególnych badanych silników. Analizy zarejestrowanych sygnałów podczas jazd testowych pozwoliły na ocenę stanu silników na podstawie pozyskanych informacji ze stanu ustalonego, jaki i stanów dynamicznych pracy tych maszyn. Wybrano najskuteczniejsze metody analizy i opracowano algorytmy oceny diagnostycznej. W oparciu o przeprowadzone analizy sformułowano procedurę badań diagnostycznych, która pozwoli na wiarygodną ocenę stanu silników podczas jazd kontrolnych. Wypracowana metoda będzie przydatna w przedsiębiorstwie do typowania maszyn do remontu, jak i kontroli stanu maszyn po wykonanych zabiegach remontowych. Opracowane procedury badań mogą zostać również zaadaptowane do oceny stanu silników indukcyjnych klatkowych w napędach innych pojazdów niż wagony tramwajowe.

Abstract: The paper presents the results of research conducted on cage induction motors in tram wagons. The research involved several dozens of motors operating in several tram wagons of a local city transport organization. The diagnostic experiment was performed in two different seasons of the year using the Rogowski coil's, data acquisition cards and dedicated computer programs. The acquired data were then subject to a detailed analysis followed by a thorough evaluation of their performance. The analysis of the registered data during test drives allowed the authors to estimate the condition of the motors based on the information gained in both transient and steady-state states. The authors selected optimum analysis tools and developed algorithms for diagnostic evaluation. Based on the analysis data the authors formulated a procedure for condition monitoring of the motors in tram wagons during test drives. The developed method will be useful for evaluating the conditions of tram wagons and scheduling their maintenance. The procedure can be adapted for evaluating the condition of cage induction motors in other types of vehicles.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, wagon tramwajowy, diagnostyka uszkodzeń, układ napędowy tramwaju, uszkodzenia elektryczne, uszkodzenia mechaniczne

Keywords: induction motor, tram wagon, damage diagnostics, tram drive system, electrical faults, mechanical faults

1. Wstęp

W nowoczesnych napędach wagonów tramwajowych zdecydowana większość maszyn napędzających te pojazdy to silniki indukcyjne klatkowe. Silniki te zasilane z przemienników częstotliwości wykazują dobre własności ruchowe, przez co są tak licznie i chętnie stosowane w napędach tramwajów. Mając na uwadze ciągle wzrastające wymagania, co do bezawaryjnej pracy tych silników i konieczność wysokiej ich niezawodności, wymagane jest przynajmniej okresowe monitorowanie i diagnozowanie stanu tych maszyn, z wykorzystaniem w pełni bezinwazyjnych i wiarygodnych metod

diagnostycznych. W literaturze można znaleźć wiele informacji na temat opracowanych i stosowanych w laboratoriach i przemyśle różnych metod diagnostycznych do badania silników indukcyjnych klatkowych [1-6, 8-20].

Większość tych badań była prowadzona dla silników, które pracują w układach napędowych posadowionych na stałych stabilnych fundamentach. Diagnostyka układów napędowych w pojazdach szynowych wprowadza dodatkowe utrudnienia związane z możliwością przemieszczania się pojazdu jak i samej konstrukcji, na której zamocowany jest badany silnik.

Układy monitoringu i diagnostyki układów napędowych, w pojazdach szynowych, nie są najczęściej wyposażone w funkcje, które na bieżąco umożliwiałyby monitorowanie i diagnozowanie stanu silników w układzie napędowym.

Również rzadko w działach eksploatacyjnych przedsiębiorstw komunikacyjnych prowadzi się okresowo rutynowe badania silników napędów wózków tramwajowych. Pojawia się więc potrzeba opracowania i wdrożenia do rutynowej eksploatacji tych napędów metod i narzędzi, które umożliwiłyby wczesne wykrycie powstającego uszkodzenia silnika. Wykrycie powstającego uszkodzenia we wczesnym stadium jego rozwoju pozwoliłoby na uniknięcie przykrych konsekwencji związanych z awarią silnika np. podczas zadania związanego z wykonywaniem przewozu osób przez przedsiębiorstwo komunikacyjne.

W pracy [16] autorzy przedstawili statystyki najczęstszych uszkodzeń silników, propozycję układów do badania różnych silników trakcyjnych oraz wyniki pilotażowych badań silników układów napędowych wagonów tramwajowych. W niniejszym artykule, który jest kontynuacją tych badań, zostaną przedstawione syntetyczne wyniki wykonanych pomiarów i ich analiz dla kilkudziesięciu silników napędów wagonów tramwajowych. Badania przeprowadzono w dwóch różnych porach roku. Pomiary zostały wykonane w okresie letnim przy temperaturze otoczenia powyżej 32°C i w okresie zimowym przy temperaturze otoczenia około -5°C. Były to zasadniczo różne warunki pracy badanych silników. Jednym z celów badań było sprawdzenie na ile warunki otoczenia wpływają na wynik pomiarów i stawianą diagnozę, co do stanu maszyny. Najbardziej istotne było sprawdzenie trendu zmian wskaźników diagnostycznych dla silników, które przy pierwszych badaniach wykazały podwyższone poziomy symptomów diagnostycznych w oparciu, o które dokonano oceny stanu.

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem cewek Rogowskiego zainstalowanych na przewodach zasilających stojany silników, karty pomiarowej i komputera przenośnego.

W oparciu o wyniki pomiarów prądów zasilających badane silniki oceniono stany klatek, stan izolacji stojana pod kątem poziomów wyładowań niepełnych, które mogą występować w uzwojeniach silników indukcyjnych zasilanych z falowników napięcia [1]. Analizując charakterystyczne cechy widm zarejestrowa-

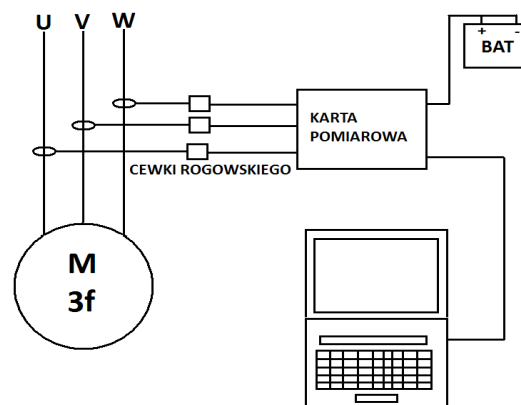
nych prądów stojana można też będzie w przyszłości ewentualnie ocenić stan łożysk i stan elementów mechanicznych w układzie przeniesienia napędu.

W dalszej części artykułu zostanie opisana metodyka badań, uzyskane wyniki oraz próby pomiarów strumienia poosiowego przy pomocy cewki pomiarowej zamocowanej do obudowy silnika od strony przeciwnapędnej.

2. Badane wagony i sposób pomiaru

Podczas jazd technicznych w okresie letnim przebadano silniki napędów wagonów tramwajowych w 6 pojazdach. Wykonano pomiary dla napędów wózków NGT6 i NGT8 i zbadano łącznie 24 silniki.

W okresie zimowym wykonano badania dla silników w układach napędowych 3 wagonach NGT6. Zbadano łącznie 12 silników, dla których można było sprawdzić zmianę trendu przyjętych do oceny wskaźników diagnostycznych. Badania silników przeprowadzono z wykorzystaniem trzech elastycznych cewek Rogowskiego CWT15 zapiętych na przewodach zasilających silnik trakcyjny, karty pomiarowej NI USB 6366, komputera przenośnego z dedykowanym oprogramowaniem do zbierania i analizy danych pomiarowych oraz akumulatora do zasilania karty pomiarowej.



Rys. 1. Układ pomiarowy do badań zespołu napędowego z silnikiem indukcyjnym klatkowym [16]

Na rys.1. przedstawiono schemat blokowy układu pomiarowego do badań diagnostycznych silników indukcyjnych klatkowych zasilanych z falownika napięcia w układzie napędowym tramwaju. Sygnały napięciowe z wyjść cewek Rogowskiego podłączono do wejść analogowych karty pomiarowej NI USB 6366. Karta

natomiast została podłączona do komputera przenośnego.

Na rys.2 przedstawiono widok zamontowanych cewek na przewodach, a na rys. 3 zestawiony układ pomiarowy z kartą pomiarową, którego schemat przedstawiono na rys.1.



Rys.2. Miejsce wpięcia cewek Rogowskiego podczas pomiarów diagnostycznych silników w układach napędowych wagonów tramwajowych



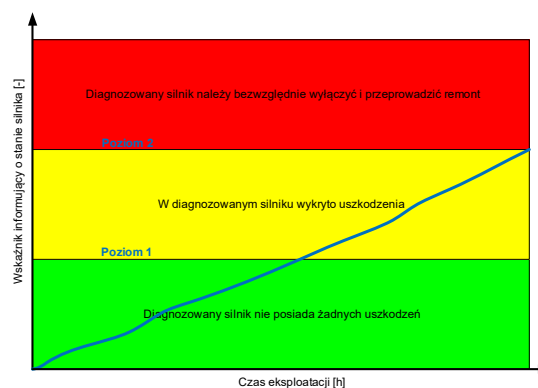
Rys.3. Zestawiony układ pomiarowy do badań diagnostycznych silników indukcyjnym klatkowym w napędach wagonów

Sygnaly napięciowe z cewek Rogowskiego proporcjonalne do prądów w uzwojeniach stojana rejestrowano z dwoma różnymi częstotliwościami próbkowania. Dla oceny stanu klatki i wykrywania uszkodzeń mechanicznych z częstotliwością 50kHz. Natomiast dla oceny stanu układu izolacyjnego sygnaly rejestrowano z maksymalną możliwą częstotliwością próbkowania karty pomiarowej 2MS/s.

3. Metody diagnostyczne i analiza zebranych danych

Do oceny stanu badanych silników należy wybrać jak najprostsze metody pozwalające najbardziej wiarygodnie ocenić stan maszyny. Metoda powinna być łatwa do zalgorytmizowania, tak, aby można było ją łatwo zaimplementować w algorytmie programu komputerowego.

Można posłużyć się ideą podejmowania decyzji diagnostycznych w oparciu o „krzywą życia maszyny”. Ideę tę przedstawiono na rys.4. Linia niebieska przedstawia zmianę trendu wskaźnika diagnostycznego w czasie. Kolorowe obszary obrazują przedziały wartości wskaźnika na podstawie, których możemy określić z przybliżeniem aktualny stan maszyny.



Rys. 4. Ilustracja idei śledzenia stanu maszyny

Dwa poziomy 1 i 2 określają graniczne wartości wskaźników, których przekroczenie powinno powodować generację alarmu o zmianie stanu badanej maszyny.

Dla badanych silników analizowano trzy prądy zarejestrowane podczas pracy w stanach dynamicznych. Wzięto pod szczególną uwagę wszystkie stany związane z rozruchem maszyny. Stanów ustalonych nie analizowano, gdyż trudno było znaleźć powtarzalne okresy rejestracji o podobnych obciążeniach i czasach trwania stanu ustalonego.

Do analizy i oceny stanu klatki badanych silników przyjęto pierwszy wskaźnik DFI (ang. *Dynamic Fault Index*) - wskaźnik uszkodzenia oparty na relacji charakterystycznych amplitud oscylacji odfiltrowanego prądu rozruchowego (w stanie dynamicznym silnika) definiowany jako:

$$DFI = Y_2 / Y_1 \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

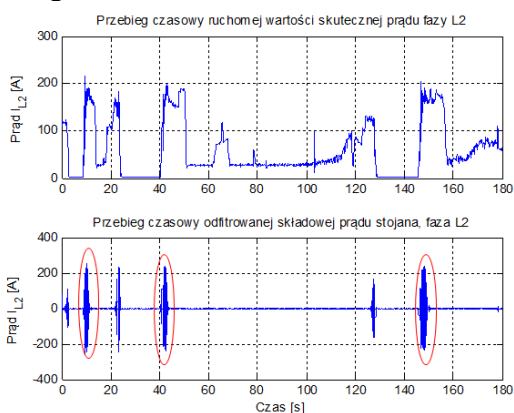
Y_1 – maksymalna amplituda sygnału w fazie stanu elektromechanicznego nieustalonego,

Y_2 – maksymalna amplituda odfiltrowanej składowej prądu w fazie przyrostu prędkości obrotowej wirnika.

Wskaźnik ten bazuje na filtracji dolnoprzepustowej sygnału prądu stojana. Filtrację sygnału przeprowadzono przy użyciu cyfrowego dolnoprzepustowego filtra Butterwortha 4-rzędu o częstotliwości odcięcia dobieranej eksperymentalnie w przedziale od 5 do 20Hz.

Do ustalenia przedziałów, z których wybierano dane do analizy, przydatny był jeszcze przebieg ruchomej wartości skutecznej prądu.

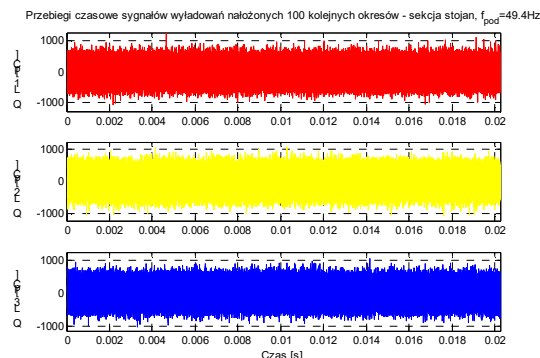
Na rys.5. zaznaczono kolorem czerwonym te przedziały dla odfiltrowanego prądu stojana, dla którego obliczano wskaźnik DFI.



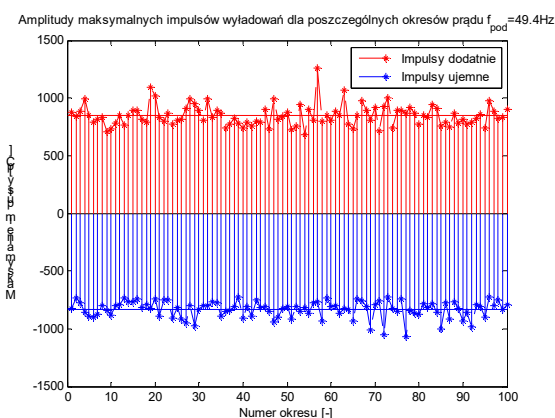
Rys. 5. Przebiegi czasowe ruchomej wartości skutecznej prądu stojana i odfiltrowanej niskoczęstotliwościowej składowej prądu

Wskaźnik ten dla silnika bez poważnych oznak uszkodzenia klatki nie powinien przekraczać 5%. Poziom ostrzegawczy dla pogarszającego się stanu silnika można przyjąć na poziomie 3%. Dzięki zastosowaniu cewek Rogowskiego do pomiarów diagnostycznych mamy również możliwość oceny stanu układu izolacyjnego badanej maszyny i sprawdzenia pracy falownika pod kątem intensywności impulsów powstających podczas procesów komutacyjnych przy przełączaniu elementów energoelektronicznych. Drugim wskaźnikiem, który przyjęto do oceny stanu układu izolacyjnego silnika to maksymalne amplitudy impulsów mających charakter wyladowań niezupełnych. Poziomem ostrzegawczym dla silników niskonapięciowych, przy którym może być generowany sygnał zmiany stanu układu izolacyjnego maszyny to poziom kilku tysięcy pC. Dla badanych silników przyjęto poziom 3000 pC.

Przykładowy wynik analizy dla jednego z silników przedstawiono na rys.6. i rys.7.



Rys. 6. Charakterystyka powtarzalności wyladowań niezupełnych dla 100 kolejnych okresów podstawowej harmonicznej prądu zasilającego badany silnik



Rys. 7. Zmiana maksymalnych amplitud impulsów wyladowań dla poszczególnych okresów podstawowej harmonicznej prądu dla 100 kolejnych okresów

W kolejnym rozdziale zestawiono wyniki badań dla silników, które był badane zarówno w okresie letnim jak i zimowym.

4. Zestawienie wyników badań silników

W tabeli od 1 do 2 zestawiono wartości średnich współczynników DFI dla badanych silników. Poszczególne pola w tabeli pokolorowano zgodnie z przyjętym kryterium oceny stanu silnika.

Tabela.1. Zestawienie wartości średnich współczynników DFI dla badanych silników – badania w okresie letnim

Pojazd/Silnika	Nr1	Nr2	Nr3	Nr4
Wagon 1	1.5	3.3	3.6	2.1
Wagon 2	3.8	2.5	3.5	2.2
Wagon 3	1.1	1.7	3.5	3.4

Tabela.2. Zestawienie wartości średnich współczynników DFI dla badanych silników – badania w okresie zimowym

Pojazd/Silnika	Nr1	Nr2	Nr3	Nr4
Wagon 1	1.7	3.1	3.8	2.4
Wagon 2	3.8	3.7	3.3	2.1
Wagon 3	3.4	1.9	3.8	3.2

Podobne analizy przeprowadzono dla określenie maksymalnych amplitud impulsów wyładowań dla poszczególnych okresów podstawowej harmonicznej prądu dla 100 kolejnych okresów.

W tabeli od 3 do 4 zestawiono wartości maksymalnych amplitud impulsów wyładowań dla 100 kolejnych okresów.

Tabela.3. Zestawienie maksymalnych amplitud impulsów wyładowań w pC – badania w okresie letnim

Pojazd/Silnika	Nr1	Nr2	Nr3	Nr4
Wagon 1	1500	3300	1300	1300
Wagon 2	1700	2500	1500	1500
Wagon 3	1100	1600	1000	1000

Tabela.4. Zestawienie maksymalnych amplitud impulsów wyładowań w pC – badania w okresie zimowym

Pojazd/Silnika	Nr1	Nr2	Nr3	Nr4
Wagon 1	1700	3500	2700	2500
Wagon 2	1600	2300	1500	1800
Wagon 3	1700	1700	1400	1300

Przeprowadzone badania stanu izolacji potwierdzają dobry stan układu izolacyjnego. Wartości kilku tysięcy pC dla pojedynczych impulsów są jak najbardziej do zaakceptowania.

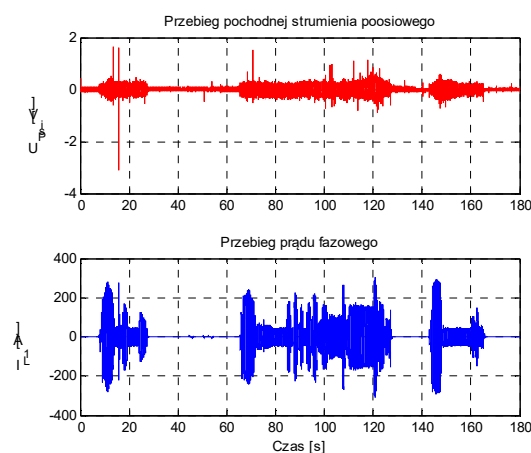
5. Próby z pomiarem pochodnej strumienia poosiowego dla badanych silników

Zaprojektowano cewkę do pomiaru strumienia poosiowego. Cewkę nawinięto na karkasie z materiału niemagnetycznego. Nawinięto około 4000 zwojów. Widok cewki i sposób jej zamocowania do badań przedstawiono na rys.8.



Rys. 8. Widok na cewkę do pomiaru strumienia poosiowego i miejsce jej zainstalowania w badanym silniku napędu wagonu

Podczas jazdy testowej zarejestrowano przebiegi sygnałów pochodnej strumienia poosiowego oraz prądu w jednej z faz. Przebieg zarejestrowanych sygnałów przedstawiono na rys.9.



Rys. 9. Przebiegi sygnałów pochodnej strumienia poosiowego oraz prądu w jednej z faz stojana

Z przedstawionych na rys.9 przebiegów można dostrzec zbyt dużą różnicę pomiędzy kształtem prądu i strumienia poosiowego.

6. Wnioski

Przeprowadzone analizy i rozpoznanie stanu silników indukcyjnych klatkowych pracujących w układach napędowych wagonów tramwajowych potwierdzają potrzebę stosowania takich badań. Szczególnie syntetyczne zestawienia wyników dla zaproponowanych wskaźników oceny pozwala zaobserwować, że z upływem czasu eksploatacji maszyn wartości tych

wskazników mogą się zmieniać w czasie i to dość znacznie. Należałoby ciągle monitorować stan silników i odpowiednio wcześniej sygnalizować powstające uszkodzenia. Badania, które przeprowadzono na kilku wagonach tramwajowych wymagają zaangażowania, dodatkowych zasobów do ich wykonania, ale pozwalają uzyskać cenną informację, co do stanu silników w układzie napędowym. Przy dalszej kontynuacji badań należy rozważyć możliwość zabudowy na stałe systemu do ciągłego monitorowania silników układów napędowych wagonu. W niedługim czasie wyposażenie pojazdów transportu publicznego, z napędem elektrycznym, w układy automatycznej diagnostyki silników, może stać się obowiązkowe.

7. 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]. T. Glinka, B. Kulesz, "Wyładowania niepełne w izolacji zwojowej silników indukcyjnych zasilanych z falowników PWM", *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, vol. 49, nr 21, str. 96-103, 2000.
- [3]. W. Rams, J. Rusek, "Praktyczna diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 68, str. 1-5, 2004.
- [4]. P. Piec, "Badanie eksploatacyjne elementów i zespołów pojazdów szynowych", *Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki*, Kraków, 2004.
- [5]. S. Szymaniec, "Diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych z wykorzystaniem cewek Rogowskiego", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 72, str. 167-172, 2005.
- [6]. S. Szymaniec, "Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji", *Studia i Monografie*, z. 193, Wydawnictwo Politechniki Opolskiej, 2006.
- [7]. T.J. Zieliński, "Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań". *Wydawnictwo Komunikacji i Łączności*, 2007.
- [8]. 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.
- [9]. A. Bellini, F. Filipetti, 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.
- [10]. A. Głowacz, Z. Głowacz, "Diagnostics of induction motor based on analysis of acoustic signals with application of FFT and classifier based on words", *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 55, issue. 3, str. 707-712, 2010.
- [11]. M. Pawlak, "Zastosowanie analiz sygnałów akustycznych do wykrywania uszkodzeń wirników i łożysk w silnikach indukcyjnych", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 92/2011, str. 199-204, 2011.
- [12]. J. Petryna, M. Sułowicz, K. Guziec, "Nowe doświadczenia w diagnostyce izolacji silników i generatorów metodą wyładowań niezupełnych", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 2/2013 (99), str. 1-7, 2013.
- [13]. J. Petryna, M. Sułowicz, A. Duda, K. Guziec, "Wykorzystanie strumienia unipolarnego w diagnostyce maszyn prądu przemiennego", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 2/2013 (99), str. 85-90, 2013.
- [14]. L. Swędrowski, "Pomiary w diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych", *Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej*, 2013.
- [15]. P. Pawlik, D. Lepiarczyk, R. Dudek, J.R. Otewill, P. Rzeszuciński, M. Wójcik, A. Tkaczyk, "Vibroacoustic study of powertrains operated in changing conditions by means of order tracking analysis", *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, Vol. 18 (4), str. 606-612, 2016.
- [16]. M. Czechowski, M. Sułowicz M, "Diagnostyka układów napędowych wagonów tramwajowych", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 2/2017 (114), str. 197-204, 2017.
- [17]. A. Głowacz, Z. Głowacz, "Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging", *Infrared Physics & Technology*, Vol. 81, str. 7-16, 2017.
- [18]. 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.
- [19]. J. Petryna, J. Tulicki, M. Sułowicz "Calculating an electromechanical torque of a squirrel cage motor based on an axial flux obtained by the FEM", *II International Conference of Computational Methods in Engineering Science (CMES'17)*, 2017, ITM Web Conf., Volume 15, str. 1-8, 2017.
- [20]. Głowacz A., "Acoustic based fault diagnosis of three-phase induction motor", *Applied Acoustics*, Vol. 137, str. 82-89, 2018.

Autorzy

dr inż. M. Sułowicz, msulowicz@pk.edu.pl
 Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii

31-155 Kraków, ul. Warszawska 24
mgr inż. Mirosław Czechowski
mczechow@mpk.krakow.pl
Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne S.A.
30-347 Kraków, ul. Jana Brożka 3

Informacje dodatkowe

Autorzy pragną podziękować Dyrekcji Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego w Krakowie za zgodę na realizację badań, udostępnienie niezbędnych danych, taboru do przeprowadzenia badań oraz za pomoc pracowników przedsiębiorstwa w realizacji badań i wszystkich prac z nimi związanymi.