

Propozycja metod diagnostyki układów napędowych wagonów tramwajowych

Mirosław Czechowski, Maciej Sułowicz

1. Wstęp

W procesie eksploatacji wagonów tramwajowych bardzo ważne jest monitorowanie zużycia podzespołów układu napędowego. W przypadku nieprzewidzianych awarii pojazdów szynowych przedsiębiorstwo komunikacyjne ponosi stratę z tytułu niewykonanych przewozów pasażerów. Kontrola elementów napędowych pojazdów, jakimi są silniki trakcyjne, przekładnie, zestawy kołowe, ma na celu bieżącą ocenę stopnia zużycia oraz określenie optymalnych cykli remontowych. Wczesne wykrycie usterki powoduje właściwe zaplanowanie cyklu naprawczego i wymierne ograniczenie strat wynikających z niewykonania usługi przewozu.

Obecnie w eksploatowanych wagonach tramwajowych bezpośrednio nie monitoruje się pracy układów napędowych. Aktualnie diagnostyka nowych układów napędowych, w skład których wchodzi silnik trakcyjny i przekładnia wraz z zestawem kołowym, polega na pomiarze temperatury, wartości skutecznych prądu, napięcia oraz prędkości silnika trakcyjnego z wykorzystaniem prostych przetworników pomiarowych. Sygnały z przetworników doprowadzone są do przekształtnika trakcyjnego bądź (w starszych typach wagonów tramwajowych) do wagonowego sterownika trakcyjnego sterującego pracą styczników w obwodzie głównym silników trakcyjnych [5–6].

Starsze typy napędów diagnozowane są przez doświadczonych pracowników, którzy podczas jazdy testowej wagonem wsłuchują się w pracę mechanizmu przekładni wózka napędowego. Na podstawie dźwięków emitowanych przez zespół napędowy zostaje oceniony stan techniczny przekładni.

Liczne publikacje i powodzenie stosowania różnych metod diagnostycznych

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę uszkodzeń zespołów napędowych wagonów tramwajowych oraz zaproponowano układ do bezinwazyjnej diagnostyki większości tych defektów. Przeprowadzono badania diagnostyczne na wybranych zespołach napędowych wagonów tramwajowych w jednym z przedsiębiorstw komunikacyjnych. Badano różne układy napędowe wagonów w pełni sprawne oraz układy napędowe z uszkodzeniami pozwalającymi na wykonanie pomiarów diagnostycznych podczas normalnej jazdy wagonu.

Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na opracowanie metodyki i zakresu badań stanu napędów wagonów tramwajowych w zależności od typu wagonu. Rejestracja i analiza kilku sygnałów prądu, napięcia, prędkości obrotowej, drgań, oprócz typowych funkcji diagnostycznych służących do określenia stanu badanych napędów, pozwala również na uzyskanie

dotychczasowych informacji np. o efektywności przetwarzania energii przez napęd wagonu tramwajowego podczas jazdy. 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 jazdy 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 szczególnie silników indukcyjnych klatkowych w napędach innych pojazdów niż wagony tramwajowe.

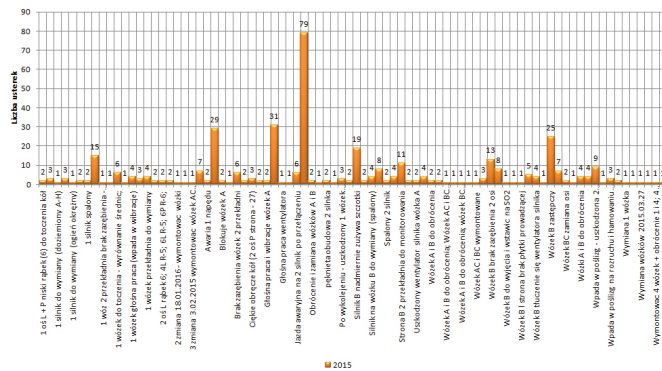
Słowa kluczowe: wagon tramwajowy, diagnostyka uszkodzeń, układ napędowy tramwaju, uszkodzenia elektryczne, uszkodzenia mechaniczne

PROPOSED METHODS OF DIAGNOSTICS OF THE DRIVE SYSTEMS OF A TRAM WAGON

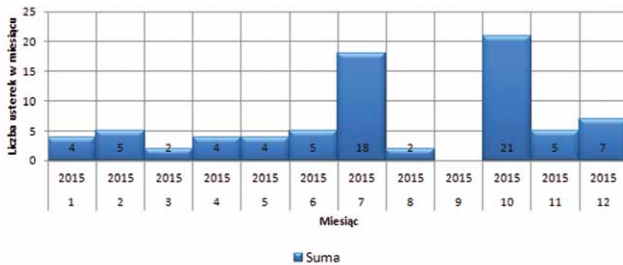
Abstract: This paper presents an analysis of faults in drive systems of tram wagons and proposes a system for the non-invasive diagnosing of the majority of these faults. Diagnostic tests were carried out on the selected drive systems of tram wagons of a public transport company. Various drive systems were tested which included both faulty drive systems and fault-free systems – this allowed for the performing of diagnostic measurements during periods of standard operation. The results of the performed tests enabled the design of appropriate methodology and the defining of the required research breadth which was to be conducted on the drive systems of tram wagons of specific types. The research required the recording and interpretation of signals relating to current, voltage, rotational speed, and vibrations – this was in addition to the standard diagnostic proce-

dures used to assess the condition of the tested drive systems. These signal records assisted in the obtaining of additional information such as that which is concerned with the effectiveness of energy conversion by the drive system of a tram wagon during its operation. 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 especially the condition of cage induction motors in other types of vehicles.

Keywords: tram wagon, faults diagnostics, tram drive system, electrical faults, mechanical faults



Rys. 1. Zestawienie usterek układu napędowego wagonów tramwajowych w 2015 roku [18]



Rys. 2. Zestawienie usterek układu napędowego wagonów tramwajowych w 2015 roku [18]

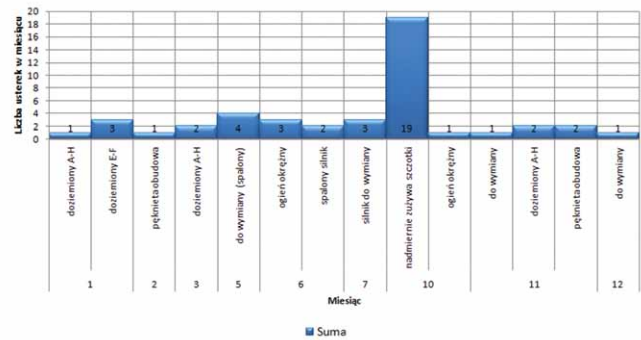
dla napędów elektrycznych z silnikami prądu przemiennego [4, 7, 7–13] w trakcie ich normalnej pracy w elektroenergetyce, skłoniły autorów do podjęcia tematu diagnostyki układów napędowych wagonów tramwajowych podczas normalnej jazdy wagonu [18]. Oprócz metod diagnostycznych opartych o analizę sygnałów elektrycznych prądu i napięcia [4, 6, 8, 12] zdecydowano się rozszerzyć analizy o sygnały wibroakustyczne [1, 10, 11, 13, 19].

W dalszej części artykułu zostanie opisana analiza awaryjności napędu wagonów tramwajowych i przyjęta metodologia ich badania oraz uzyskane wyniki analiz diagnostycznych przykładowych pomiarów. Naszkicowana zostanie także możliwość integracji informacji o stanie napędu uzyskanej po zamontowaniu dodatkowych elementów pomiarowych z istniejącym systemem monitoringu w pojeździe tramwajowym.

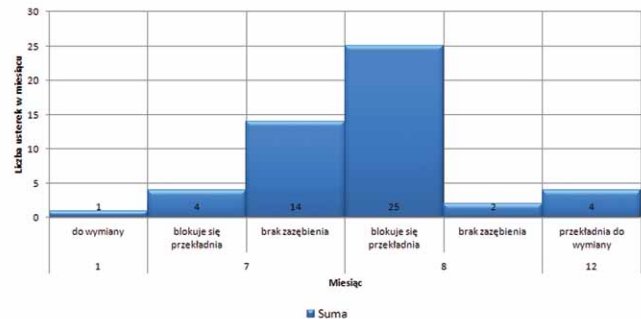
Większa część artykułu została opublikowana w [20]. Niniejszy artykuł jest rozszerzeniem tej wersji, uzupełnionym o opis metod diagnostycznych i analizę zebranych danych zawartych w pracy [23].

2. Analiza i rozpoznanie najczęstszych przyczyn awarii napędów wagonów

Analizę i rozpoznanie najczęstszych przyczyn awarii oraz uszkodzeń elementów układów napędowych wagonów tramwajowych typu EU8N, N8 przeprowadzono na podstawie „Książek



Rys. 3. Zestawienie usterek silnika trakcyjnego w 2015 roku [18]



Rys. 4. Zestawienie usterek przekładni zestawu napędowego w 2015 roku [18]

defektów wagonów” prowadzonych codziennie przez mistrzów zmianowych w jednym z przedsiębiorstw komunikacyjnych. Badanie usterkowości obejmowało cały rok 2015. „Książki defektów wagonów” są dokumentami, na podstawie których wykonywane są analizy usterkowości pojazdów szynowych eksploatowanych w tym przedsiębiorstwie [18].

Na rys. 1 przedstawiono zbiorcze zestawienie usterek układów napędowych eksploatowanych wagonów tramwajowych w roku 2015.

Uszkodzenia z kategorii „silnik” obejmują wszystkie awarie dotyczące samego silnika trakcyjnego wagonów tramwajowych. Dokładne opisy usterek za rok 2015 zostały umieszczone na rys. 2.

W roku 2015 największą liczbę usterek dotyczącą silników trakcyjnych zanotowano w październiku – 21 zgłoszeń oraz w lipcu – 18 zgłoszeń. W marcu odnotowano dwa zgłoszenia. Wrzesień był miesiącem, kiedy nie odnotowano usterek.

Na rys. 3 przedstawiono rozszerzone informacje o dominujących usterekach w eksploatowanych silnikach tramwajowych. W 2015 roku największym problemem były nadmiernie zużywające się szczotki silnika.

Z końcem lipca oraz początkiem sierpnia 2015 roku zanotowano zwiększoną liczbę usterek przekładni wózków napędowych. Na podstawie zestawienia przedstawionego na rys. 4 można wywnioskować, że w lipcu zgłoszono 14 przypadków na

„brak zazębienia”, natomiast w sierpniu było 25 usterek z bloku-
jącą się przekładnią.

Na rys. 5 przedstawiono zestawienie najbardziej awaryjnych wagonów tramwajowych obsługiwanych przez Stację Obsługi Tramwajów.

Analiza wpisów przez okres 12 miesięcy w codziennych rapor-
tach dokonywanych przez mistrzów zmianowych w „Książ-
kach defektów wagonu” wykazała, że największa awaryjność
układów napędowych w roku 2015 występowała w wagonach
EU8N. Najwięcej zgłoszeń awarii odnotowano w lipcu. Były to
54 zgłoszenia. Podobną liczbę 53 zgłoszeń awarii zanotowano
w styczniu.

3. Układy pomiarowe do badania napędów wagonów tramwajowych

Opracowano dwa układy do pomiarów diagnostycznych
napędów w wagonach tramwajowych. Pierwszy układ opraco-
wano dla wagonów: EU8N, N8C, N8S z silnikami trakcyjnymi
prądu stałego. Drugi z opracowanych układów jest dedykowany
dla wagonów z napędami, w których zastosowano silniki induk-
cyjne klatkowe zasilane z falowników napięcia.

3.1. Układ pomiarowy dla diagnostyki napędów z silnikami prądu stałego

Na rys. 6 przedstawiono schemat blokowy układu pomiaro-
wego do badań diagnostycznych zespołu napędowego tramwaju
typu EU8N, N8S i N8C.

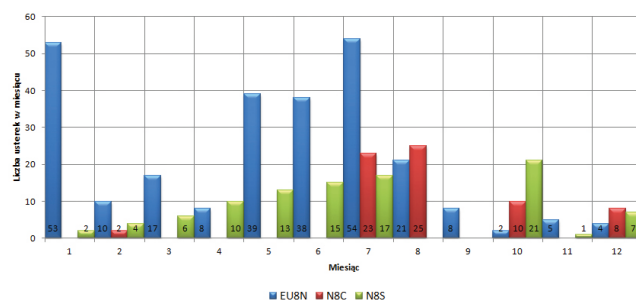
Układ pomiarowy dla diagnostyki stanu zespołu napędo-
wego wagonu tramwajowego zbudowano z kilku przetwornik-
ków pomiarowych i systemu rejestrującego opartego o kartę
pomiarową DAQ i komputer przenośny.

Pierwszy element pomiarowy to izolowana napięciowa
sonda różnicowa TT SI 9002 firmy TESTEC, przeznaczona do
pomiaru napięcia na zaciskach silnika trakcyjnego. Do pomiaru
prądu w odwodzie zasilania silnika zastosowano cęgi prądowe
i310s firmy Fluke. Do pomiaru składowej zmiennej prądu
pobieranego przez badany silnik zastosowano elastyczną cewkę
Rogowskiego CWT firmy PEM. Rejestrowano także dwa sygnały
napięciowe proporcjonalne do prędkości kół badanego wózka
oraz sygnał referencyjny proporcjonalny do prędkości wagonu.

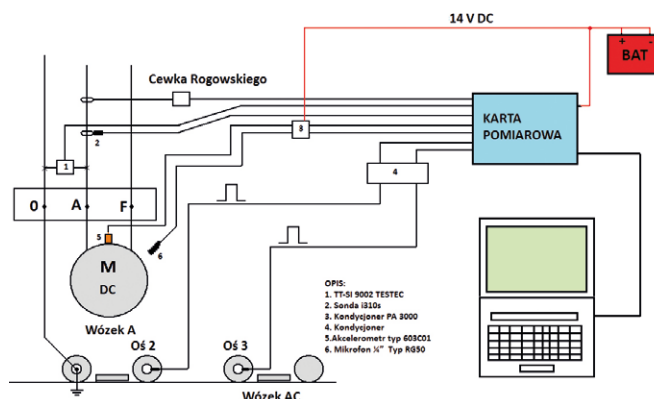
Oprócz tych sygnałów rejestrowano jeszcze sygnał z mikro-
fonu RG-50 firmy ROGA, umieszczonego na siedzeniu pasażer-
skim w odległości 70 cm od silnika trakcyjnego, i akcelerometru
typu 603C01 firmy IMI Sensors przytwierdzonego na korpusie
silnika trakcyjnego za pomocą magnesu. Do kondycjonowania
sygnałów z mikrofonu i akcelerometru zastosowano trzykana-
łowy kondycjoner PA-3000. Wszystkie sygnały bezpośrednio
z przetworników pomiarowych lub wyjść układów kondycjo-
nowania podłączono do wejść wielofunkcyjnej karty pomiarowej
NI USB 6259.

Przy pomocy zestawionego układu pomiarowego rejestro-
wano jednocześnie 7 sygnałów z częstotliwością próbkowania
20 kHz. Widok zestawionego układu pomiarowego wewnątrz
wagonu tramwajowego przedstawiono na rys. 7 i rys. 8.

Do zbierania i analizy przebiegów czasowych zarejestrowa-
nych podczas jazd testowych wagonów przygotowano oprogra-
mowanie w środowisku MATLAB.



Rys. 5. Zestawienie awaryjności dla poszczególnych typów wagonów tramwajowych w 2015 roku [18]



Rys. 6. Schemat blokowy układu pomiarowego do badań zespołu napędowego tramwaju

Ze względu na silne zakłócenia z sieci pokładowej wagonu tramwajowego zdecydowano się na zasilanie karty oraz układów kondycjonowania z akumulatora.

3.2. Układ pomiarowy dla diagnostyki napędów z silnikami indukcyjnymi

Na rys. 9 przedstawiono schemat blokowy układu pomiaro-
wego do badań diagnostycznych układu napędowego tramwaju
z silnikami indukcyjnymi klatkowymi zasilanymi z falownika.
Takie rozwiązania układów napędowych są stosowane w eks-
ploataowanych w przedsiębiorstwie tramwajach NGT6, NGT8
lub 2014N.

Podstawowymi przetwornikami pomiarowymi w tym ukła-
dzie są 3 elastyczne cewki Rogowskiego CWT15 związane na
przewodach zasilających silnik trakcyjny. Sygnały z cewek pod-
łączone do wejść analogowych karty pomiarowej NI USB 6259.
Karta natomiast została podłączona do komputera przenośnego.

Na rys. 10 i rys. 11 przedstawiono zestawiony układ pomia-
rowy według schematu z rys. 9.

4. Metody diagnostyczne i analiza zebranych danych

4.1. Diagnostyka napędów z silnikami prądu stałego

Pomiary diagnostyczne dla wagonów tramwajowych z sil-
nikami prądu stałego wykonano podczas jazdy technicznej
tramwaju.



Rys. 7. Układ pomiarowy do badań układu napędowego z silnikiem prądu stałego



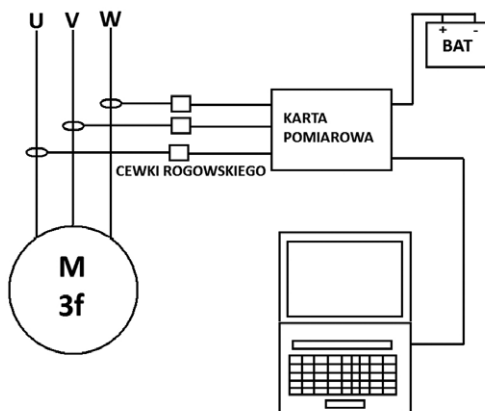
Rys. 10. Miejsce wpięcia cewek Rogowskiego



Rys. 8. Widok tabliczki zaciskowej badanego silnika z zamontowanym układem pomiarowym



Rys. 11. Układ pomiarowy do badań diagnostycznych napędu z silnikiem indukcyjnym klatkowym



Rys. 9. Układ pomiarowy do badań układu napędowego z silnikiem indukcyjnym klatkowym

Podczas badań każdego napędu wagonu tramwajowego rejestrowano 7 sygnałów przez cały okres czasu. Długość czasu rejestracji była zależna od trasy przejazdu. Trasy przejazdu obejmowały odcinki o zmiennym nachyleniu terenu umożliwiające, szczególnie przy rozruchach silników na podjazdach, uzyskać trudniejsze warunki pracy napędów podczas jazd testowych.

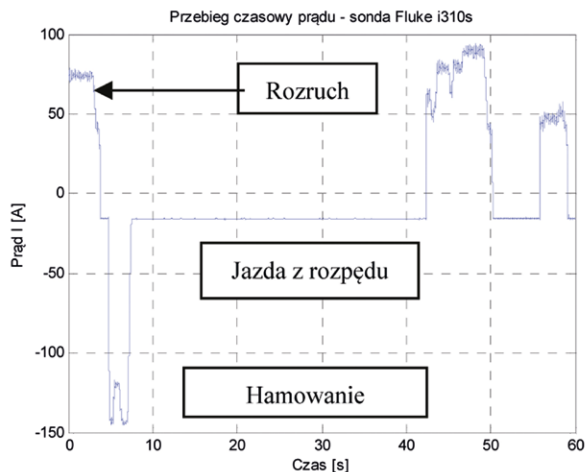
Układy napędowe podczas badań pracowały najczęściej w cyklach: rozruch, jazda z rozpędu, hamowanie. Dynamika przejazdu podczas większości jazd testowych była podobna. Przykładowy przebieg prądu w głównym obwodzie zasilania badanego napędu z zaznaczeniem cykli pracy silnika przedstawiono na rys. 12.

Zarejestrowane sygnały prądów, napięć, drgań i ciśnienia akustycznego poddano analizie częstotliwościowej. Z widm sygnałów wybrano charakterystyczne częstotliwości, które mogą wskazywać na występowanie określonego rodzaju uszkodzenia w układzie napędowym. Wybór częstotliwości był związany z charakterystycznymi cechami budowy poszczególnych elementów układu napędowego. Wzięto pod uwagę: liczbę elementów tocznych łożysk, liczbę zębów przekładni i inne czynniki.

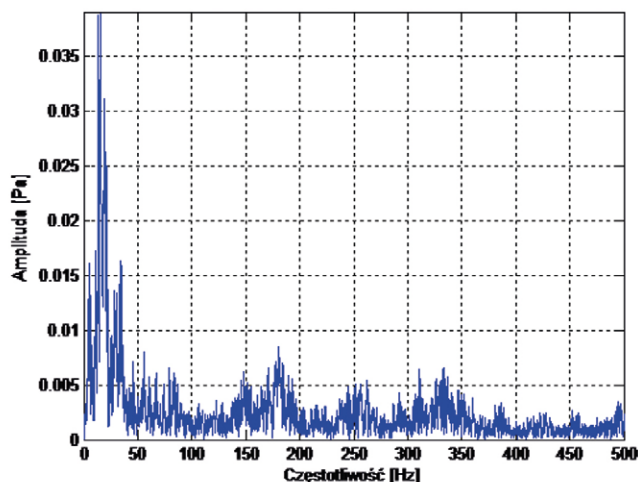
Sygnały drgań i hałasu próbowano maksymalnie odseparować od wpływu zewnętrznych zakłóceń związanych z pracą napędu i czynnikami zewnętrznymi. Przykładowe widma drgań i hałasu przedstawiono na rys. 13 i rys. 14.

W oparciu o zarejestrowane dane można również analizować pobór mocy przez silnik trakcyjny.

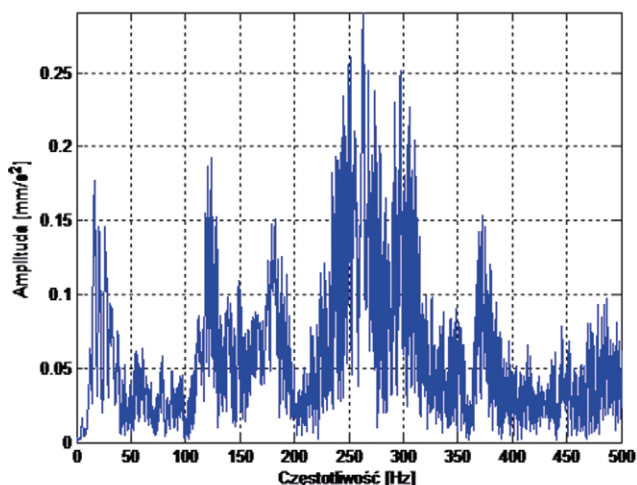
Na rys. 15 przedstawiono przebieg czasowy mocy chwilowej pobieranej przez silnik trakcyjny 1JB 2021 3MC02. Analiza mocy chwilowej pobieranej przez silnik pozwala na



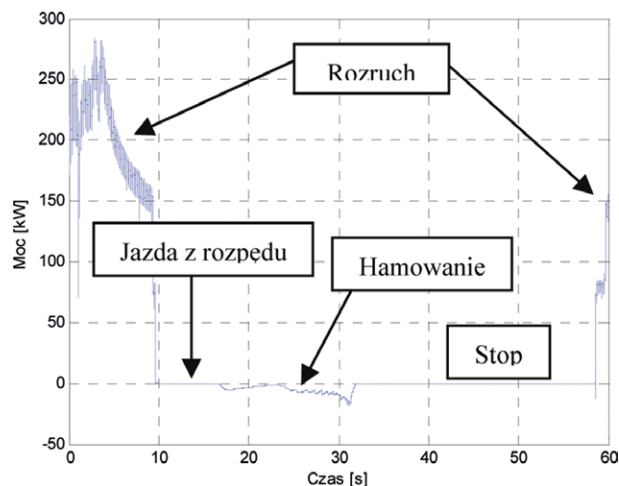
Rys. 12. Przykładowy przebieg czasowy prądu w obwodzie zasilania silnika



Rys. 14. Widmo amplitudowe hałasu



Rys. 13. Widmo amplitudowe drgań



Rys. 15. Przebieg czasowy mocy chwilowej pobieranej przez silnik trakcyjny 1JB20213MC02

szczegółowe rozpoznanie kierunku przepływu mocy dla układów napędowych z odzyskiem energii. Analizy takie mogą pozwolić na zoptymalizowanie dynamiki przejazdu tramwaju pod kątem minimalnego zużycia energii.

4.2. Przypadek uszkodzenia przekładni układu napędowego

Przed wykonaniem badań jednego z wagonów stwierdzono bardzo głośną pracę układu napędowego. Za pomocą układu pomiarowego do badań silników prądu stałego przeprowadzono rejestrację sygnałów diagnostycznych przy pracy napędu na krótkim odcinku jazdy testowej. Analiza widmowa drgań i hałasu wskazywała na występowanie charakterystycznych częstotliwości związanych z uszkodzeniem układu napędowego.

Po wymontowaniu uszkodzonego wózka i demontażu przekładni stwierdzono, że uszkodzeniu uległ zębnik przekładni pierwszej osi. Rys. 16 przedstawia uszkodzony zębnik przekładni.

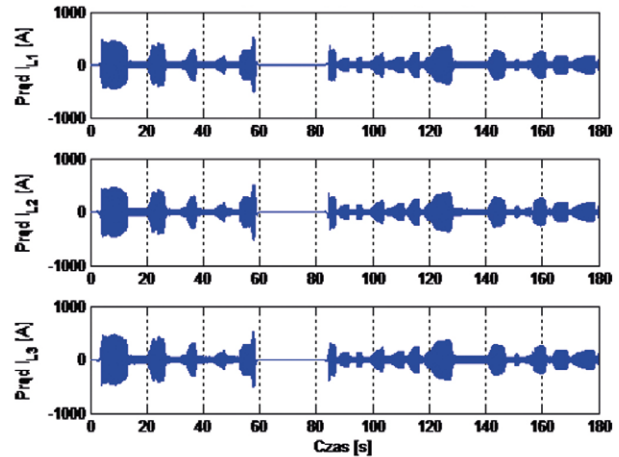
Szybkie wychwycenie usterki przez pracowników Stacji Obsługi Tramwajów spowodowało, że nie zostały uszkodzone koła talerzowe przekładni.

4.3. Diagnostyka napędów z silnikami indukcyjnymi

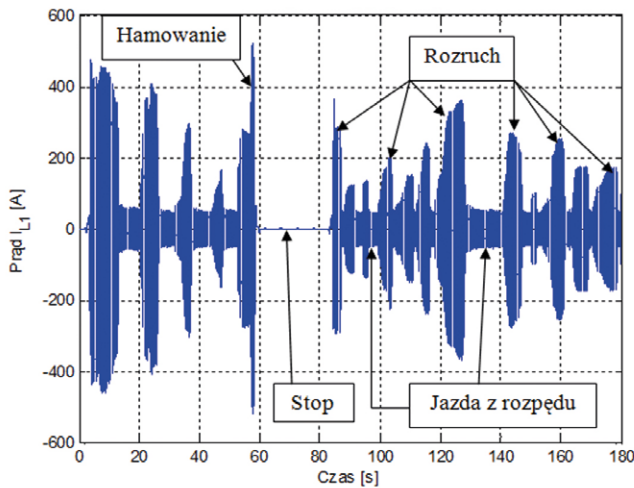
Podobnie jak dla pomiarów diagnostycznych, dla wagonów tramwajowych z silnikami prądu stałego dane rejestrowano podczas normalnej jazdy tramwaju. Przykładowy przebieg prądu stojana rejestrowanego podczas jazdy z zaznaczonymi cyklami pracy napędu przedstawiono na rys. 17.



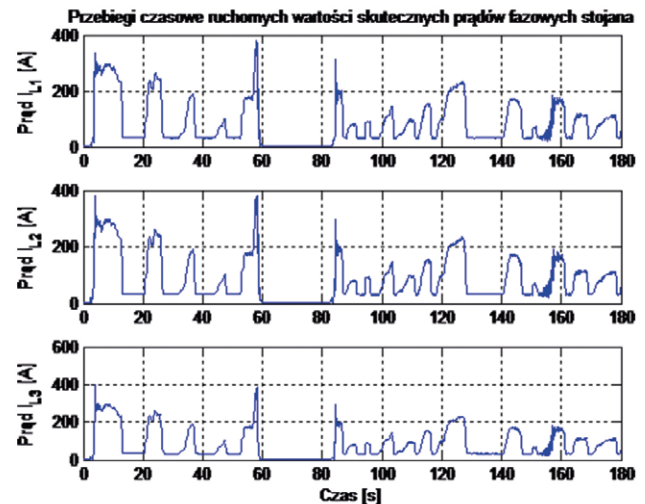
Rys. 16. Uszkodzony zębik przekładni



Rys. 18. Przebiegi czasowe trzech prądów fazowych stojana



Rys. 17. Przykładowy przebieg czasowy prądu fazy L1 stojana podczas jazdy testowej

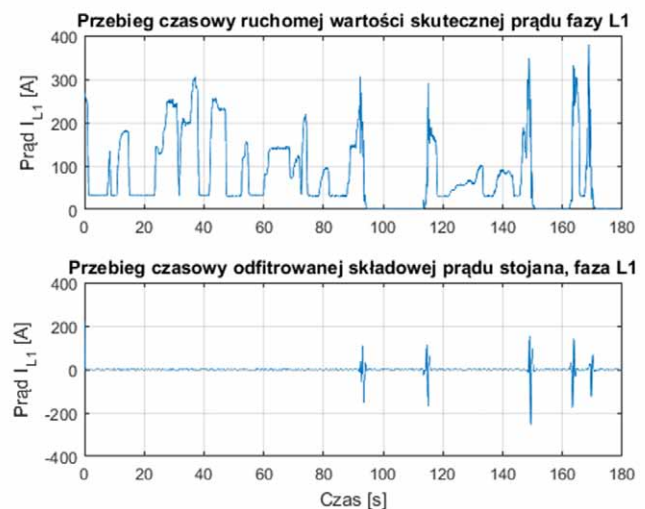


Rys. 19. Przebiegi czasowe ruchomych wartości skutecznych prądów fazowych stojana

Analizowano trzy zarejestrowane prądy podczas pracy w stanach dynamicznej oraz pracy napędu w stanie ustalonym.

Dla stanów dynamicznych analizowano zmiany ruchomych wartości skutecznych prądu oraz odfiltrowane składowe prądu stojana. Filtrację sygnału przeprowadzono przy użyciu cyfrowego dolnoprzepustowego filtra Butterwortha 4-rzędu o częstotliwości odcięcia dobieranej eksperymentalnie w przedziale od 5 do 20 Hz. Przebiegi czasowe prądów i ich analizę przedstawiono na rys. 18 do rys. 20.

Oprócz analiz odfiltrowanych składowych prądu stojana oraz ruchomych wartości skutecznych prądów w stanach dynamicznych przeprowadzono analizy widma prądu dla pracy układu napędowego przy niezmiennych warunkach jazdy wagonu tramwajowego. Przykładowe widmo prądu stojana



Rys. 20. Przebiegi czasowe ruchomej wartości skutecznej prądu stojana i odfiltrowanej niskoczęstotliwościowej składowej prądu

z zaznaczeniem charakterystycznych częstotliwości wybranych do oceny stanu badanego silnika przedstawiono na rys. 21.

Częstotliwościowe metody analizy prądów stojana pozwalają na wiarygodną ocenę stanu wirnika badanego silnika w ustalonych stanach pracy maszyny. Można przy użyciu tych metod wykryć uszkodzenia klatki wirnika i łożysk. Zastosowanie cewek Rogowskiego w układzie pomiarowym pozwala także na ocenę stanu układu izolacyjnego badanej maszyny i sprawdzenia pracy falownika pod kątem intensywności impulsów powstających przy przełączaniu elementów energoelektronicznych.

4.4. 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. 22. 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.

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 [23]:

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

gdzie:

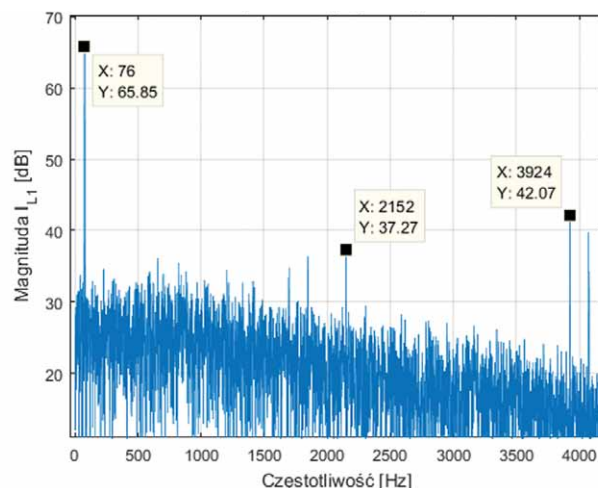
Y_1 – maksymalna amplituda sygnału w fazie stanu elektromechanicznego nieustalonego;

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

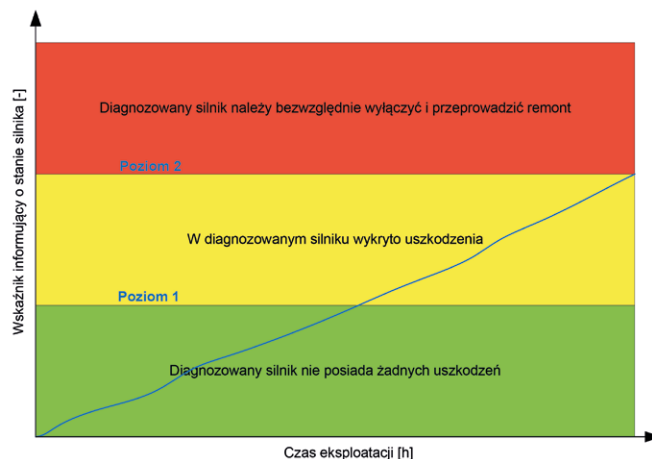
Wskaźnik ten bazuje na filtracji dolnoprzepustowej sygnału prądu stojana. Filtrację sygnału przeprowadzono przy użyciu cyfrowego dolnoprzepustowego filtra Butterwortha 4 rzędu o częstotliwości odcięcia dobieranej eksperymentalnie w przedziale od 5 do 20 Hz.

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

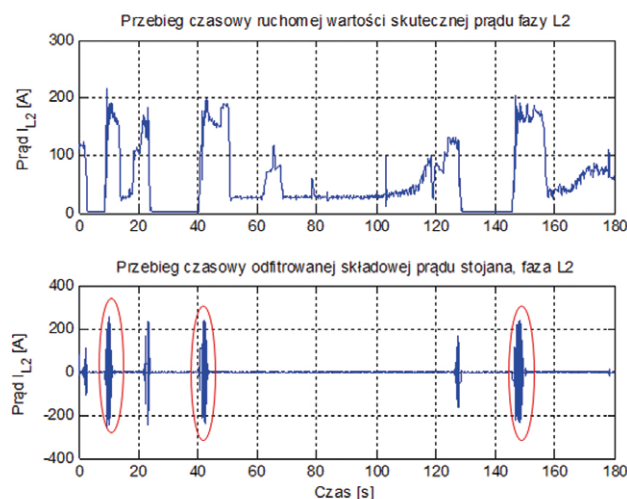
Na rys. 23 zaznaczono kolorem czerwonym te przedziały dla odfiltrowanego prądu stojana, dla którego obliczano wskaźnik DFI.



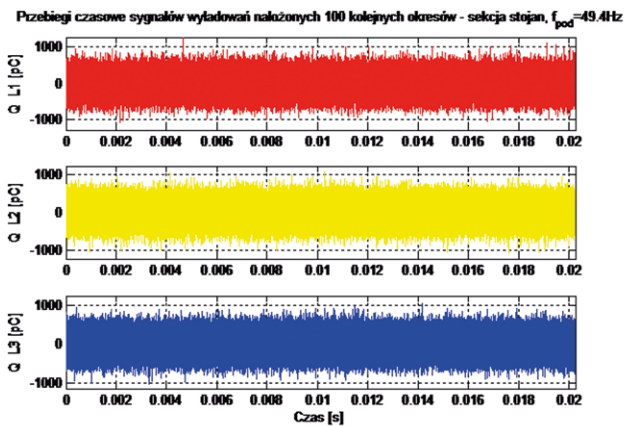
Rys. 21. Widmo amplitudowe prądów stojana, faza L1 przy niezmiennych się warunkach jazdy wagonu tramwajowego



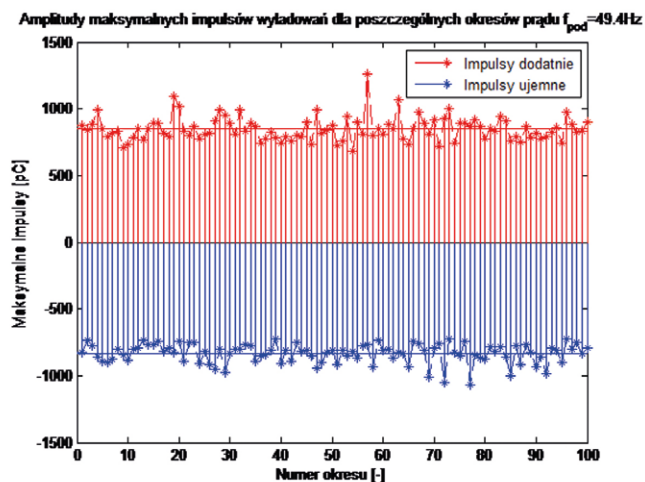
Rys. 22. Ilustracja idei śledzenia stanu maszyny



Rys. 23. Przebiegi czasowe ruchomej wartości skutecznej prądu stojana i odfiltrowanej niskoczęstotliwościowej składowej prądu



Rys. 24. Charakterystyka powtarzalności wyładowań niezupełnych dla 100 kolejnych okresów podstawowej harmonicznej prądu zasilającego badany silnik



Rys. 25. Zmiana maksymalnych amplitud impulsów wyładowań dla poszczególnych okresów podstawowej harmonicznej prądu dla 100 kolejnych okresów

Wskaźnik ten dla silnika bez poważnych oznak uszkodzenia klatki nie powinien przekraczać 5%. Poziom ostrzegawczy dla pogarszającego się stanu silnika można przyjąć na poziomie 3,0%.

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 [7, 14].

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

Pojazd/Silnik	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 4
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/Silnik	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 4
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

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

Pojazd/Silnik	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 4
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/Silnik	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 4
Wagon 1	1700	3500	2700	2500
Wagon 2	1600	2300	1500	1800
Wagon 3	1700	1700	1400	1300

Drugim wskaźnikiem, który przyjęto do oceny stanu układu izolacyjnego silnika, są maksymalne amplitudy impulsów mających charakter wyładowań niezupełnych [3, 14].

Poziomem ostrzegawczym dla silników niskonapięciowych, przy którym może być generowany sygnał zmiany stanu układu izolacyjnego maszyny, jest poziom kilku tysięcy pC. Dla badanych silników przyjęto poziom 3000 pC.

Przykładowy wynik analizy dla jednego z silników przedstawiono na rys. 24 i rys. 25.

reklama

reklama

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

4.5. Zestawienie wyników z badań silników

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

Podobne analizy przeprowadzono dla określenia maksymalnych amplitud impulsów wyładowań dla poszczególnych okresów podstawowej harmonicznej prądu dla 100 kolejnych okresów [14].

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

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

5. Podsumowanie

W artykule opisano awaryjność napędów wagonów tramwajowych oraz zaproponowano sposób jej obniżenia poprzez stosowanie szczegółowych bezinwazyjnych badań diagnostycznych elementów składowych napędów wagonów tramwaju. Przeprowadzone analizy pozwoliły na sformułowanie dokładniejszych potrzeb w zakresie diagnozowania uszkodzeń układów napędowych.

Przy wykonywaniu badań diagnostycznych przeprowadzono również analizę działania systemu monitoringu układów napędowych pojazdów szynowych serwisowanych przez Stację Obsługi Tramwajów.

Analiza działania istniejącego systemu monitoringu urządzeń i układów napędowych wagonu tramwajowego pozwoliła na opracowanie koncepcji rozbudowy takiego systemu o wczesne sygnalizowanie złego stanu maszyny napędowej. Przeprowadzone badania wykazały, iż nowe modele pojazdów szynowych powinny być wyposażone w dodatkowe czujki, umożliwiające bieżącą kontrolę stanu maszyn napędowych.

Mając na uwadze bezpieczeństwo pasażerów oraz zapewnienie napędowi optymalnej i bezawaryjnej pracy, pomiędzy remontami zalecane jest okresowe wykonywanie proponowanych badań diagnostycznych.

Ułatwieniem w wykonywaniu badań diagnostycznych może być przenośny zestaw pomiarowy, umożliwiający szybką ocenę stanu zespołu napędowego wózka tramwajowego w trakcie jego normalnej eksploatacji.

Doświadczenie zdobyte przy budowie prototypów układów pomiarowych zostanie wykorzystane przez autorów do opracowania funkcjonalnego i efektywnego narzędzia do oceny stanu różnych typów napędów wagonu tramwajowego podczas przejazdu technicznego.

W przyszłości należy rozważyć możliwość rozbudowy istniejącego systemu pomiarowego w wagonach tramwajowych o dodatkowe funkcje diagnostyczne, a w nowo budowanych pojazdach – seryjnego montażu takiego systemu jako standardu poprawiającego bezpieczeństwo transportu publicznego.

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 wskaźników mogą się zmieniać w czasie i to dość znacznie.

W niedługim czasie wyposażenie pojazdów transportu publicznego z napędem elektrycznym w układy automatycznej diagnostyki silników może stać się obowiązkowe.


Literatura

- [1] CEMPEL Cz.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. PWN, Warszawa 1989.
- [2] BENBOUZID M.: *A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, no. 5, 2000, pp. 984–993.
- [3] GLINKA T., KULESZ B.: *Wyładowania niezupełne w izolacji zwojowej silników indukcyjnych zasilanych z falowników PWM*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, vol. 49, nr 21, 2000, s. 96–103.
- [4] RAMS W., RUSEK J.: *Praktyczna diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 68/2004.
- [5] PIEC P.: *Badanie eksploatacyjne elementów i zespołów pojazdów szynowych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004.
- [6] ROMANISZYN Z.: *Podwozia wózkowe pojazdów szynowych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2005.
- [7] SZYMANIEC S.: *Diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych z wykorzystaniem cewek Rogowskiego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 72/2005.
- [8] ZIELIŃSKI T.J.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 2007.
- [9] KOWALSKI C.T., KANIOR W.: *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, Wrocław 2007.
- [10] BELLINI A., FILIPETTI F., TASSONI C., CAPOLINO G.A.: *Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 12, Dec. 2008, pp. 4109–4126.
- [11] GŁOWACZ A., GŁOWACZ Z.: *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, 2010, pp. 707–712.
- [12] PAWLAK M.: *Zastosowanie analiz sygnałów akustycznych do wykrywania uszkodzeń wirników i łożysk w silnikach indukcyjnych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 92/2011.
- [13] PETRYNA J., SUŁOWICZ M., GUZIEC K.: *Nowe doświadczenia w diagnostyce izolacji silników i generatorów metodą wyładowań niezupełnych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2(99)/2013.
- [14] SUŁOWICZ M., PETRYNA J., WEINREB K., GUZIEC K.: *Porównawcze pomiary defektów klatek rozruchowych silników indukcyjnych pod kątem wykorzystania w diagnostyce*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 99/2013.
- [15] KOWALSKI C.T.: *Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.

- [16] SWĘDROWSKI L.: *Pomiary w diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013.
- [17] STARCZYŃSKI J., SUŁOWICZ M.: *Wykrywanie uszkodzeń w silnikach indukcyjnych w oparciu o sygnały akustyczne*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 4(108)/2015.
- [18] CZECHOWSKI M.: *Monitoring i diagnostyka układów napędowych wagonów tramwajowych*, Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Krakowska, Kraków 2016.
- [19] PAWLIK P., LEPIARCZYK D., DUDEK R., OTTEWILL J.R., RZESZUCIŃSKI P., WÓJCIK M., TKACZYK A.: *Vibroacoustic study of powertrains operated in changing conditions by means of order tracking analysis*. „Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability” 18(4)/2016.
- [20] CZECHOWSKI M., SUŁOWICZ M.: *Diagnostyka układów napędowych wagonów tramwajowych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2(114)/2017.
- [21] GŁOWACZ A., GŁOWACZ Z.: *Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging*, Infrared Physics & Technology, Vol. 81, s. 7–16, 2017.
- [22] CHOQUEUSE V., ELBOUCHIKHI E., OUBRAHIM Z., BENBOUZID M.: *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, 2017, pp. 8093–8098.
- [23] SUŁOWICZ M., CZECHOWSKI M.: *Diagnostyka silników indukcyjnych klatkowych w układach napędowych wagonów tramwajowych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 3(119)/2018.

Pierwsza wersja artykułu powstała w wyniku realizacji pracy dyplomowej magisterskiej pt. *Monitoring i diagnostyka układów napędowych wagonów tramwajowych*. Praca została zrealizowana na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej.

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

 mgr inż. Mirosław Czechowski – e-mail: mczechow@mpk.krakow.pl,
Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne SA;
dr inż. M. Sułowicz – e-mail: msulowicz@pk.edu.pl,
Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej
i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii

artykuł recenzowany