

Jakub Zielonka, Maciej Sułowicz, Politechnika Krakowska, Kraków
Mirosław Czechowski, Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne S.A. Kraków

SYSTEM ZBIERANIA DANYCH Z CZUJNIKÓW ZABUDOWANYCH W SMARTFONACH NA POTRZEBĘ MONITOROWANIA WYBRANYCH PARAMETRÓW POJAZDÓW Z NAPIĘDEM ELEKTRYCZNYM

SMARTPHONE SENSORS DATA ACQUISITION SYSTEM FOR THE NEED TO MONITOR SELECTED PARAMETERS OF VEHICLES WITH ELECTRIC DRIVE

Streszczenie: Monitorowanie stanu elementów napędu elektrycznego pojazdów elektrycznych jest kluczowym zagadnieniem w celu zapewnienia jak największej bezawaryjności maszyny oraz służy zminimalizowaniu kosztów związanych z ewentualnymi usterkami czy awariami. Artykuł przedstawia koncepcję systemu monitorującego wybrane sygnały diagnostyczne za pomocą kart pomiarowych oraz sensorów telefonu komórkowego – smartfonu. Badania przeprowadzono na pokładzie tramwaju miejskiego, gdzie monitorowano pracę silników indukcyjnych klatkowych będącymi głównymi elementami układu napędowego. Zebrane dane przy pomocy karty pomiarowej i czujników smartfonu, zestawiono i porównano w celu wyciągnięcia wniosków diagnostycznych.

Abstract: Monitoring the condition of the electric drive components of electric vehicles is a key issue in order to ensure the greatest possible uptime of the machine and is used to minimize the costs associated with possible faults or failures. The article presents the concept of a system for monitoring selected diagnostic signals with the use of measurement cards and sensors of a mobile phone - smartphone. The tests were carried out on board a city tram where the squirrel cage induction motors, which are the main elements of the drive system, was monitored. The data collected with the measurement card and smartphone sensors were summarized and compared to draw diagnostic conclusions.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, diagnostyka silników indukcyjnych, sensory smartfonu, monitoring, akwizycja sygnałów diagnostycznych.*

Keywords: *electric machines, induction motor diagnostics, smartphone sensors, monitoring, acquisition of diagnostic signals.*

1. Wstęp

Obecnie obserwuje się stale rosnące wymagania, stawiane w przemyśle, wobec wydajności układów elektromechanicznych. Konieczna zatem staje się właściwa eksploatacja oraz diagnostyka tych obiektów [1]. Wraz z postępującym rozwojem technologii, dotychczasowe metody wykorzystywane w zagadnieniach monitoringu i diagnostyki układów elektrycznych, powinny być ciągle rozwijane i modernizowane. Systemy pomiarowo kontrolne, wykorzystywane w różnych dziedzinach przemysłu składają się głównie z komputerów, kart pomiarowych i różnorodnych czujników.

Opracowany przez autorów tego artykułu system monitorujący parametry pojazdów z napędem elektrycznym, składa się z komputera wraz z podłączoną do niego kartą pomiarową, dokonującą akwizycji sygnałów

diagnostycznych takich jak: prądy i napięcia fazowe oraz sygnał prędkości sterującej silnikami napędowymi. Dodatkowym elementem, a zarazem nietypowym, jest smartfon będący częścią opracowanego systemu monitorującego parametry pojazdów elektrycznych.

Przeprowadzono badania nad możliwościami praktycznego wykorzystania smartfonów jako urządzeń do szybkiego pozyskania informacji o parametrach obiektu badanego. W tym konkretnym przypadku badania odbyły się pod kątem wykrycia ewentualnych uszkodzeń w układzie napędowym wagonu tramwajowego.

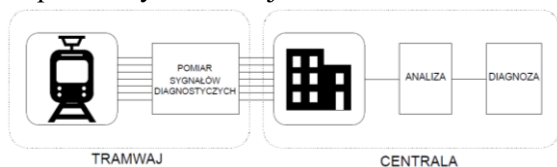
Dostępne na rynku smartfony cechują się różnymi parametrami, w tym czujnikami jakie zostały zabudowane wewnątrz każdego z nich. Większość tych czujników stosowana jest na

potrzeby własne telefonu, jak chociażby najpopularniejszy GPS informujący o aktualnej lokalizacji lub czujnik położenia służący do rozpoznawania w jakiej orientacji znajduje się smartfon.

Spośród wszystkich powszechnie stosowanych sensorów zabudowanych w smartfonach, do zagadnień monitoringu i diagnostyki wybrano: akcelerometr (czujnik drgań), czujnik indukcji pola magnetycznego oraz GPS. W dalszej części artykułu przedstawiono dane uzyskane za pomocą wymienionych sensorów smartfonu i zestawiono je z sygnałami prądów fazowych zasilających silniki napędowe tramwaju.

2. Charakterystyka systemu

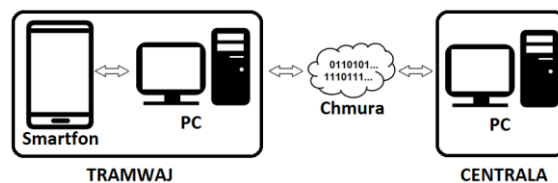
Omawiany system do monitorowania parametrów, opracowano w oparciu o zagadnienia związane z diagnostyką zdalną (Rys. 1) [2, 6]. Głównym założeniem było to, aby dostęp, do zamontowanego na pojeździe elektrycznym systemu, był zdalny. Kontrola komputera odpowiedzialnego za wykonywanie skryptów do akwizycji sygnałów diagnostycznych, odbywa się z pośrednictwem bezprzewodowego łącza internetowego – gdzie funkcję routera pełni wspomniany wcześniej smartfon.



Rys. 1. Koncepcja diagnostyki zdalnej

Układ pomiarowy dokonuje pomiarów wielkości fizycznych a następnie przesyła je na komputer, który to za pomocą odpowiednich narzędzi dokonuje przetworzenia i analizy zebranych danych. Do tak zebranych danych operator ma dostęp praktycznie cały czas i na bieżąco może obserwować aktualne parametry elektryczne obiektu.

Taka metoda pomiaru jest możliwa dzięki nowoczesnym narzędziom, które pozwalają na wymianę danych między urządzeniami za pośrednictwem chmury – przestrzeni dyskowej na serwerze. MATLAB Mobile jest jednym z tych narzędzi, dostępnych na smartfony, pozwalające na akwizycję sygnałów mierzonych jego sensorami. Dane te są przesyłane do komputera centralnego poprzez wspomnianą wcześniej chmurę (Rys. 2).



Rys. 2. Schemat blokowy transmisji danych

Dzięki wykorzystaniu kompletu narzędzi od jednego producenta, uzyskuje się w pełni kompatybilny i synchroniczny system wymiany danych oraz ich analizy.

3. Charakterystyka metody badań

Badaniom poddano układ napędowy tramwaju elektrycznego Bombardier NGT6, wchodzącego w czynny skład taboru komunikacji miejskiej w Krakowie.

Wspomniany model tramwaju posiada dwa wózki napędowe, z których każdy zawiera po dwa silniki indukcyjne klatkowe. Ze względów fizycznych, jednoczesne monitorowanie silników obu wózków napędowych jest bardzo ciężkie. Zdecydowano zatem prowadzić badania o łącznym czasie jednego miesiąca, gdzie pojedynczy wózek napędowy monitorowany był przez okres dwóch tygodni.

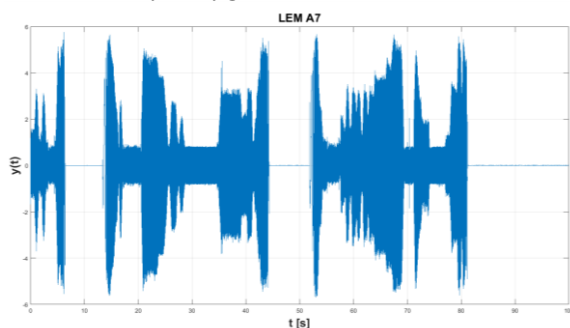
Całość systemu zabudowano w hermetycznych skrzyniach tak, aby można je umieścić na dachu tramwaju. Okablowanie systemu pomiarowego doprowadzono przez odpowiednio przygotowane wodoszczelne rury. Opracowany system pozwala na jednoczesne monitorowanie dwóch silników wchodzących w skład jednego wózka napędowego. Sygnały diagnostyczne jakie podane zostały kontroli to: napięcia i prądy fazowe zasilające silniki, prąd w obwodzie rezystora hamowania, sygnały prędkości wału silnika oraz sygnał referencyjny pochodzący od kół tocznych pojazdów. Sumarycznie z jednego wózka napędowego pozyskuje się 18 sygnałów. Dodatkowe wykorzystanie czujników smartfonu pozwala na pozyskanie wartości drgań i indukcji pola magnetycznego. Ze względu na to, że smartfon zlokalizowany jest na dachu pojazdu to zmierzone wartości nie można odnieść bezpośrednio do stanu silników napędowych. Należy je analizować w kontekście pracy całego pojazdu, a zmierzoną indukcję interpretować jako wartość pola pochodząca od linii przesyłowych. Trzecim wykorzystanym czujnikiem smartfonu był GPS, dzięki któremu naniesiono na mapę trasę przejazdu tramwaju w poszczególnym okresie, co z kolei daje do-

datkowe informacje do oceny stanu układu napędowego.

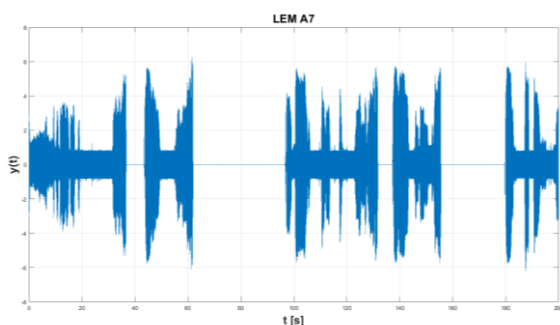
4. Przedstawienie wyników badań

Największą uwagę poświęcono zmierzonym sygnałom prądów fazowych. Jak wskazuje wiele pozycji literatury, w sygnale prądu fazowego silnika indukcyjnego zawarta jest znaczna część informacji, mogących pomóc w ocenie aktualnego stanu badanego silnika [3, 4, 5].

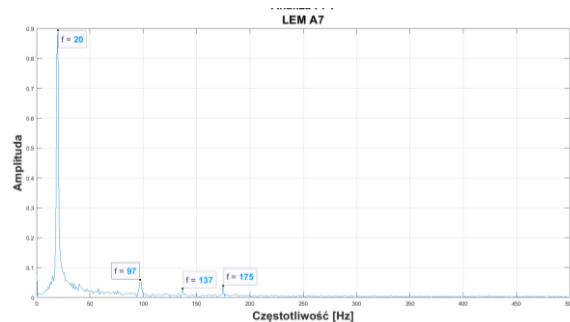
Poniżej przedstawiono wykresy wybranych sygnałów z dwóch różnych tras przejazdowych oznaczonych jako trasa A i B. Rysunki 3, 4 przedstawiają przebieg prądu fazowego fazy L1 zasilającej jeden z silników napędowych tramwaju, zaś rysunki 5, 6 obrazują analizę widmową FFT tych sygnałów.



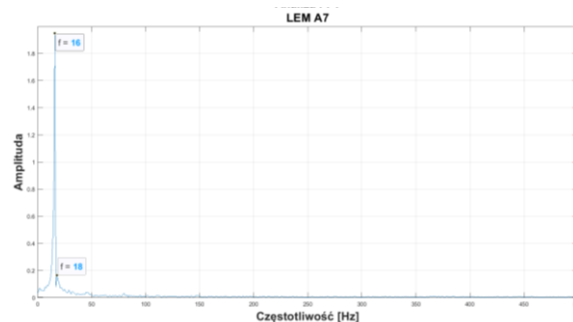
Rys. 3. Prąd fazy L1 – trasa A



Rys. 4. Prąd fazy L1 – trasa B.



Rys. 5. Analiza widmowa prądu fazowego – trasa A



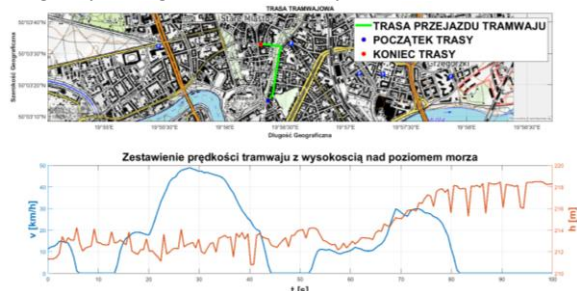
Rys. 6. Analiza widmowa prądu fazowego – trasa B

Na podstawie uzyskanych widm prądów fazowych z przedziałów ustalonej pracy napędu, zaobserwowano pojawienie się charakterystycznych wyższych harmonicznych, podczas pomiarów przejazdu tramwaju na trasie A. Monitorowanie tego samego prądu fazowego na trasie B nie wykazało innych znacznych amplitud częstotliwości widma niż zerowa i podstawowa. Istnieje wiele metod służących diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych. Poniżej scharakteryzowano wybrane z nich, które wykorzystują sygnały prądu i napięcia do wykrywania uszkodzeń [7, 8, 9]:

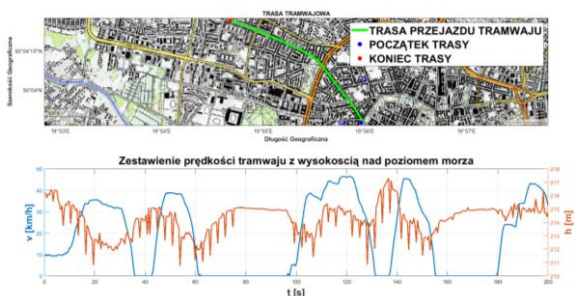
- Metoda klasyczna – sygnał prądowy podawany jest na filtr Notcha (50 Hz) w celu redukcji składowej sieciowej, a następnie wzmacniany. Cyfrowy sygnał poddaje się analizie FFT, która informuje o charakterystycznych częstotliwościach, świadczących o uszkodzeniu.
 - Metoda mocy chwilowej – analogiczna metoda co klasyczna. W tym przypadku analizuje się widmo częstotliwościowe mocy chwilowej będącego w uproszczeniu iloczynem prądu i napięcia w danej chwili czasu. Cechą odróżniającą jest to, że większość częstotliwości diagnostycznych mieści się w przedziale 0 – 100 Hz.
 - Metoda rozszerzonej analizy prądu – w tej metodzie, cyfrowy sygnał prądu poddaje się transformacji do składowych w przestrzeni Parka. Zaletą tej operacji jest uzyskanie w widmie częstotliwościowym prądu mniejszych poziomów szumu.
- Możliwe usterki jakie mogą zostać wykryte z wykorzystaniem metod bazujących na obserwacji sygnałów prądu i napięcia silnika indukcyjnego klatkowego to m.in. [10]:
- Uszkodzenia uzwojeń stojana,
 - Uszkodzenia cewek w żłobkach rdzenia stojana,
 - Uszkodzenia na czołach uzwojenia stojana,

- Uszkodzenia uzwojenia wirnika,
- Uszkodzenie łożysk,
- Niewyważenie wału silnika,
- Niewyosowanie wału silnika.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przebiegi tras tramwajowych oraz na rysunkach 9 i 10 pomiary akcelerometrem i czujnikiem pola magnetycznego, zabudowanymi w telefonie.



Rys. 7. Dane pomiarowe GPS – trasa A



Rys. 8. Dane pomiarowe GPS – trasa B

Linie zielone naniesione na mapy obrazują przebytą trasę tramwaju, na której wykonany został pomiar parametrów pojazdu. Wykresy pod mapami ilustrują prędkość pojazdu oraz przybliżoną wysokość nad poziomem morza, na której w danej chwili czasu tramwaj się znajdował. Takie zestawienie może być pomocne w celach optymalizacyjnych i logistycznych, aby dopasować jak najlepsze parametry jazdy do warunków trasy przejazdowej.

Ponieważ sensory smartfonu umożliwiają pomiar drgań i indukcji pola magnetycznego w trzech osiach, zastosowano wzór 1, aby przedstawić wypadkowe wartości tych wielkości fizycznych.

$$P = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (1)$$

Gdzie:

P – wypadkowa wartość sygnału,

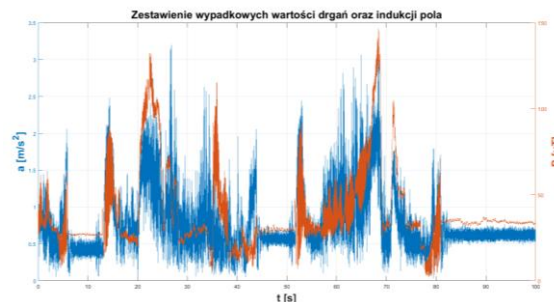
X – wartość sygnału w osi x,

Y – wartość sygnału w osi y,

Z – wartość sygnału w osi z.

Na rysunkach 9 oraz 10, sygnał oznaczony kolorem niebieskim, przedstawia pomiar drgań

zaś sygnał koloru czerwonego odpowiada zmniejszonej indukcji pola magnetycznego.



Rys. 9. Pomiar sensorami smartfonu – trasa A



Rys. 10. Pomiar sensorami smartfonu – trasa B

Observacje przedstawionych parametrów, pozwoliły stwierdzić, że wraz z większym poborem prądu przez układ napędowy, co tożsame jest z przyspieszaniem pojazdu, poziom drgań oraz indukcji pola osiągają większe wartości. Nie jest to nic dziwnego, gdyż większy pobór energii powoduje zwiększenie wartości prądu płynącego przez linie przesyłowe a tym samym wzrasta indukcja pola magnetycznego wokół przewodów przesyłowych. Zmierzone poziomy drgań całego pojazdu, w tym przypadku nie wykraczają poza dopuszczalne normy. Oscylacyjny charakter wynika z faktu, że torowisko po jakim porusza się tramwaj jak i same obręcze kół tocznych mogą zawierać uszczerbki i nierówności. Na podstawie pomiarów akcelerometrem smartfonu możliwe jest wyciągnięcie wstępnych wniosków diagnostycznych co do stanu niektórych elementów.

Odpowiedź na pytanie o pojawienie się wyższych harmonicznych w widmie prądu (Rys. 5-6), można uzyskać analizując przejazd tramwaju (Rys. 7-8). Na trasie A, tramwaj musiał wykonać manewr ostrego skrętu, zaś na odcinku B trasa przebiegała niemal w linii prostej. Na tej podstawie można wnioskować o prawdopodobnym zużyciu elementów przeniesienia napędu.

5. Podsumowanie

W artykule opisano system do monitoringu parametrów pojazdów elektrycznych z wykorzystaniem kart pomiarowych oraz sensorów zabudowanych w smartfonach. Przeprowadzone badania pozwoliły na potwierdzenie koncepcji, w której to do zagadnień diagnostyki i monitoringu można wykorzystać sensory telefonów komórkowych.

Smartfony mogą posłużyć również w zakresie związanym z polepszeniem komfortu czy bezpieczeństwa przejazdu pasażerów. Tu przykładem mogą być osoby, które korzystają z takich urządzeń jak rozruszniki serca. Monitorowanie za pomocą smartfonu, indukcji pola magnetycznego wewnątrz wagonu tramwajowego dawałoby informację czy nic nie zakłóci poprawnej pracy wspomnianego wyżej rozrusznika serca.

Planowane są dalsze prace nad usprawnieniem przedstawionego systemu pomiarowego wraz z badaniem poszczególnych zagadnień technicznych, w których ów system odnalazłby zastosowanie.

6. Literatura

- [1]. T. Glinka, S. Szymaniec "Diagnostyka maszyn i urządzeń – uwagi ogólne", *NIS – napędy i sterowanie*, nr 5, str. 1, 2020.
- [2]. 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, page 4, 2018.
- [3]. W. Rams, J. Rusek "Praktyczna diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych", *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 68, str. 1-5, 2004.
- [4]. 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, 2007.
- [5]. M. Sułowicz, J. Petryna, K. Weinreb, K. Guziec "Porównawcze pomiary defektów klatek rozruchowych silników indukcyjnych pod kątem wykorzystania w diagnostyce", *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 99, str. 77-83, 2013.
- [6]. J. Zielonka "Opracowanie metody i systemu do ciągłej rejestracji sygnałów diagnostycznych na potrzebę oceny stanu silników pracujących

w napędach wagonów tramwajowych", Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Krakowska, 2021.

- [7]. M.E.H. Benbouzid „A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 5, page 987-991, 2000.
- [8]. G.B. Klimanet, et al. „Methods of motor current signature analysis”, *Elect. Mach. Power Syst.*, Vol. 20, No. 5, 1992.
- [9]. G. B. Klimanet, et al „Induction motor fault detection via passive current monitoring”, *Int. Conf. Electrical Machines*, Vol. 1, Cambridge, MA, 1990.
- [10]. B. Drak „Typowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 89, 2011.

Autorzy

mgr inż. Jakub Zielonka,
jzielonka@gmail.com

dr hab. inż. Maciej Sułowicz, prof. PK, msulowicz@pk.edu.pl

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Katedra Inżynierii Elektrycznej,

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.

Przedstawione wyniki badań, zrealizowano w ramach pracy magisterskiej, zatytułowanej „Opracowanie metody i systemu do ciągłej rejestracji sygnałów diagnostycznych na potrzebę oceny stanu silników pracujących w napędach wagonów tramwajowych”, obronionej na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej w roku 2021.