

*monitorowanie i diagnostyka, silnik indukcyjny,
analiza częstotliwościowa prądu stojana*

Marcin PAWLAK*

ZDALNY SYSTEM POMIAROWY SILNIKA INDUKCYJNEGO DLA URZĄDZEŃ PRZENOŚNYCH Z SYSTEMEM ANDROID

W artykule przedstawiono koncepcję zdalnego systemu pomiarowego do diagnostyki silników indukcyjnych, który w części sprzętowej wykorzystuje dowolne urządzenie przenośne z systemem Android (np. telefon komórkowy, czy tablet), na którym zainstalowano specjalistyczne oprogramowanie diagnostyczne. Część pomiarową systemu stanowią dwie przystawki cęgowe typu CA60, które mierzą prąd silnika w dwóch fazach. Sygnały pomiarowe doprowadzone są do mikroprocesorowego rejestratora, który przesyła próbki pomiarowe do urządzenia przenośnego drogą radiową, wykorzystując technologię Bluetooth.

1. WSTĘP

W ostatnim dziesięcioleciu zaobserwować można gwałtowny rozwój techniki w zakresie wytwarzania i dostępności komputerów przenośnych typu PDA (ang. *Personal Digital Assistant*). W szczególności rynek telefonów komórkowych ewaluował w kierunku upowszechnienia tzw. smartfonów, czyli urządzeń mobilnych pełniących funkcję telefonu i komputera osobistego. Biorąc pod uwagę stronę sprzętową, urządzenia te są wysokowydajnymi komputerami, bogato wyposażonymi w różne układy peryferyjne, które rozszerzają ich możliwości o dodatkowe funkcje multimedialne i komunikacyjne. Od strony softwareowej urządzenia te najczęściej pracują pod kontrolą „lekkich” systemów operacyjnych, przeznaczonych głównie dla urządzeń przenośnych, z których najpopularniejsze w ostatnim czasie to: iOS, Windows Mobile (Windows Phone) oraz Android. Otwarta budowa tych systemów stwarza praktycznie nieograniczone możliwości tworzenia własnego oprogramowania, dzięki czemu urządzenia przenośne mogą być wykorzystane w bardzo wielu dziedzinach technicznych,

* Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, marcin.pawlak@pwr.wroc.pl

odmiennych od tych, do których pierwotnie były przeznaczone. Przykładem zastosowania może być diagnostyka napędów elektrycznych.

Do oceny stanu technicznego silników w czasie ich normalnej pracy wykorzystuje się różnego rodzaju urządzenia pomiarowe, które na bieżąco monitorują podstawowe sygnały fizyczne pracujących maszyn. Niestety, aparatura diagnostyczna, w skład której wchodzi zestaw odpowiednich czujników oraz specjalistyczny komputer do analizy sygnałów pomiarowych, jest bardzo kosztowna, zatem jej stosowanie ogranicza się praktycznie do dużych maszyn. Z kolei silniki małej mocy stanowią najliczniejszą grupę maszyn, które pełnią często odpowiedzialne funkcje w procesach technologicznych. Dlatego ciągle poszukuje się niedrogich rozwiązań sprzętowych, które pozwolą zaimplementować zagadnienia diagnostyki eksploatacyjnej również do napędów mniejszej mocy [3], [4].

Niniejszy artykuł przedstawia możliwość wykorzystania tanich, ogólnodostępnych urządzeń mobilnych z systemem Android do realizacji systemu pomiarowo-diagnostycznego, przeznaczonego dla napędów z silnikami indukcyjnymi, który umożliwi ocenę ich stanu technicznego na podstawie analizy sygnałów prądów fazowych.

2. DIAGNOSTYKA SILNIKÓW INDUKCYJNYCH NA PODSTAWIE ANALIZY CZĘSTOTLIWOŚCIOWEJ PRĄDU STOJANA

W sygnałach prądów fazowych silnika indukcyjnego zawarte są rozmaite cechy diagnostyczne wynikające z asymetrii elektrycznej i magnetycznej obwodów stojana i wirnika. Cechy te uwidaczniają się w widmie prądu fazowego oraz w widmie modułu wektora przestrzennego prądu, w postaci składowych spektralnych charakterystycznych dla poszczególnych rodzajów uszkodzeń [1].

W przypadku uszkodzenia prętów klatki wirnika, w widmie prądu fazowego pojawiają się składowe opisane następującymi zależnościami:

$$f_{sk1,2} = (1 \pm 2ks)f_s \quad (2)$$

gdzie: f_s – harmoniczna podstawowa prądu stojana, s – poślizg, $k = 1, 2, 3, \dots$

Składowe te, po transformacji pojawiają się również w widmie modułu wektora przestrzennego prądu [2] w postaci prążków o częstotliwości f_{pk} :

$$f_{pk} = 2ksf_s \quad (3)$$

W przypadku asymetrii napięć zasilających silnik, w widmie modułu wektora przestrzennego prądu pojawia się składowa f_A o częstotliwości:

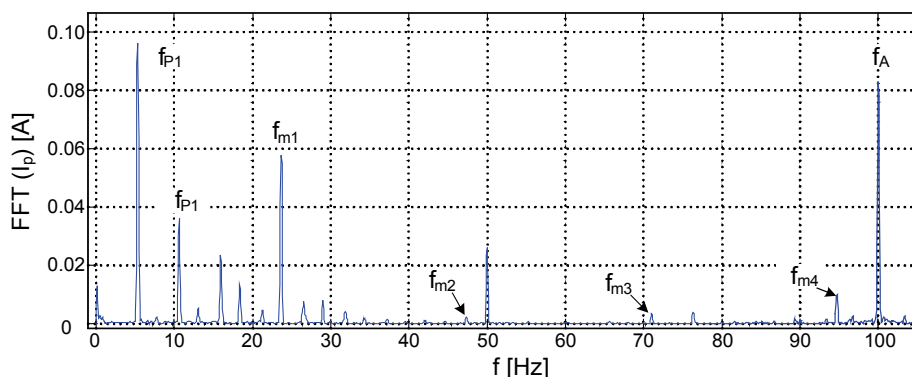
$$f_A = 2f_s \quad (4)$$

Pojawienie się tej składowej może również świadczyć o asymetrii w uzwojeniach stojana, spowodowanej np. zwarcie kilku zwojów. W przypadku niewłaściwego

sprzęgnięcia silnika z maszyną roboczą, gdy oś silnika nie pokrywa się z osią maszyny roboczej, w widmie modułu wektora przestrzennego prądu stojana pojawiają się składowe o częstotliwościach f_{mk} :

$$f_{mk} = f_s - f_s \left[1 - k \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (5)$$

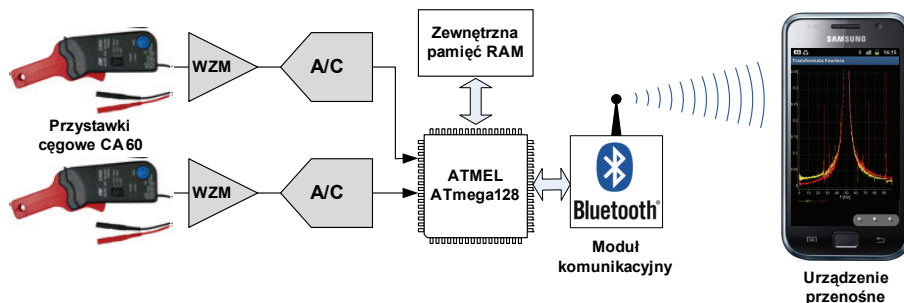
Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe widmo modułu wektora przestrzennego prądu stojana silnika z uszkodzonym wirnikiem, dla przypadku 4 przerwanych prętów klatki. Na rysunku zaznaczono charakterystyczne składowe spektralne związane z uszkodzonym wirnikiem (f_{P1} , f_{P2}), asymetrią napięć zasilających (f_A) oraz nieosiołym połączeniu silnika z maszyną roboczą (f_{m1} – f_{m4}).



Rys. 1. Widmo modułu wektora przestrzennego prądu stojana silnika z uszkodzonym wirnikiem
Fig. 1. Park's vector modulus spectrum for induction motor with faulty rotor

3. BUDOWA ZDALNEGO SYSTEMU POMIAROWEGO

Zadaniem zdalnego systemu pomiarowego silnika indukcyjnego jest zarejestrowanie sygnałów pomiarowych prądów fazowych silnika w dwóch fazach, a następnie przesłanie ich drogą radiową z wykorzystaniem standardu Bluetooth[®] do urządzenia przenośnego. W roli urządzenia przenośnego może być wykorzystany dowolny telefon komórkowy lub tablet, posiadający system operacyjny Android w wersji przynajmniej 2.1. Na urządzeniu przenośnym musi być zainstalowane oprogramowanie sterująco-diagnostyczne, które będzie w stanie odebrać rekordy próbek pomiarowych oraz przeprowadzić analizę diagnostyczną tych sygnałów, pod kątem detekcji charakterystycznych cech, odpowiadających wybranym uszkodzeniom silnika. Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy systemu pomiarowego.



Rys. 2. Schemat blokowy systemu pomiarowego
 Fig. 2. Schematic diagram of measurement system

W roli czujników prądów zastosowano niedrogie przystawki cęgowe typu CA60, które umożliwiają pomiar prądów fazowych silnika bez potrzeby rozłączania układu zasilania. Przetworniki te posiadają dwa zakresy pomiarowe (15 A i 60 A), co pozwala na zastosowanie ich do diagnostyki większości silników małej i średniej mocy.

Sygnaly pomiarowe prądów fazowych są w dalszej części wzmacniane i doprowadzone do wejść przetwornika A/C. W rozwiązaniu prototypowym zastosowano czterokanałowy przetwornik typu AD7863, który posiada 14-bitową rozdzielczość, przy maksymalnej częstotliwości próbkowania rzędu 175kHz.

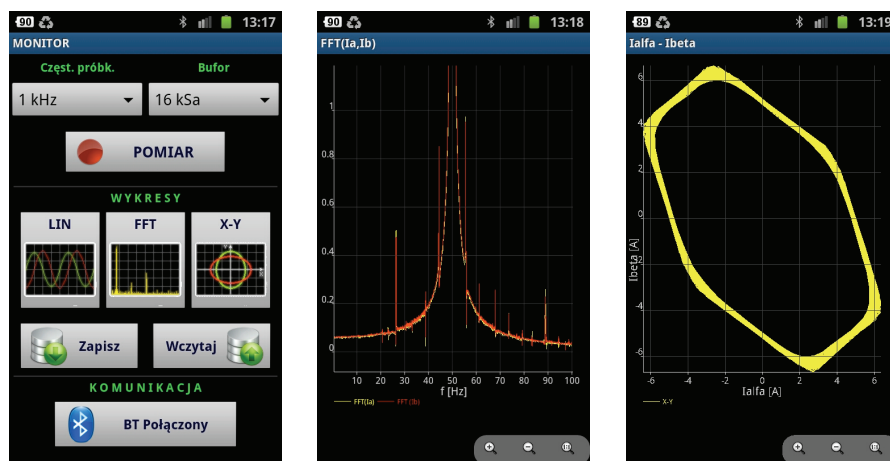
Głównym elementem sterującym układu pomiarowego jest popularny 8-bitowy mikrokontroler typu ATmega128 z rodziny Atmel AVR[®], który obsługuje pracę przetwornika A/C i zapisuje zmierzone próbki sygnałów w zewnętrznej pamięci RAM. Do zadań mikrokontrolera należy również wymiana danych z urządzeniem przenośnym, która odbywa się za pomocą modułu komunikacyjnego typu BTM112. Moduł ten obsługuje dwukierunkową komunikację radiową w standardzie Bluetooth[®], przy czym wymiana danych z mikrokontrolerem odbywa się za pomocą standardowego interfejsu szeregowego.

Zdalny system pomiarowy został wykonany w wersji prototypowej. Urządzenie posiada kompaktową budowę i zasilane jest z akumulatorów, co eliminuje konieczność stosowania zewnętrznego źródła zasilania. Obsługa systemu pomiarowego jest bardzo prosta i sprowadza się do włączenia zasilania rejestratora i przetworników cęgowych oraz wybrania zakresu pomiarowego. Sterowanie układem pomiarowym oraz ustawienie parametrów rejestracji odbywa się z poziomu aplikacji MONITOR, zainstalowanej w urządzeniu przenośnym.

4. OPROGRAMOWANIE ZDALNEGO SYSTEMU POMIAROWEGO

Oprogramowanie zdalnego systemu pomiarowego (MONITOR) zostało napisane w języku Java w środowisku Eclipse, z zainstalowanym narzędziem Android SDK. Skła-

da się ono z dwóch części funkcyjnych: modułu sterującego oraz analizatora danych pomiarowych. Głównym zadaniem modułu sterującego jest zdalna komunikacja z układem pomiarowym oraz parametryzacja i sterowanie procesem akwizycji danych pomiarowych. Użytkownik może ustawić częstotliwość próbkowania w zakresie 1-50 kHz oraz wybrać wielkość bufora danych dla każdego kanału w zakresie 512-32768 próbek. Po zakończeniu rejestracji próbek pomiarowych, bufor danych jest automatycznie przesyłany do urządzenia przenośnego drogą radiową, w technologii Bluetooth. Odebrane dane mogą być zapisane na wewnętrznej karcie pamięci flash, co ułatwia późniejsze zarządzanie nimi. Analizator danych pomiarowych przetwarza zarejestrowane dane pomiarowe i wykonuje na nich szereg przekształceń i obliczeń numerycznych, takich jak: wyznaczenie modułu wektora przestrzennego prądu stojana, obliczenie wartości skutecznych, nakładanie funkcji okien czasowych, analiza częstotliwościowa FFT, ekstrakcja wybranych składowych spektralnych z widma. Wyniki tych przekształceń prezentowane są w formie czytelnych wykresów, które użytkownik może dowolnie powiększać, obracać i skalować, korzystając z ekranu dotykowego urządzenia przenośnego, obsługującego funkcję „multi-touch”. W przyszłości, w programie zostaną zaimplementowane dodatkowe funkcje, wspomagające automatyczną ocenę stanu technicznego badanego silnika. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe zrzuty ekranów programu MONITOR.



Rys. 3. Przykładowe zrzuty ekranów oprogramowania diagnostycznego
Fig. 3. Example screenshots of diagnostic software

5. PODSUMOWANIE

Przedstawiony w referacie zdalny system pomiarowy silnika indukcyjnego jest praktycznym przenośnym zestawem diagnostycznym, umożliwiającym określenie stanu techniczne-

go silników indukcyjnych o różnych mocach, na podstawie pomiaru sygnałów prądów stojana w dwóch fazach. Najważniejszym elementem systemu jest oprogramowanie sterująco-diagnostyczne, zainstalowane w urządzeniu przenośnym, które umożliwi zdalną komunikację z układem pomiarowym w technologii Bluetooth oraz analizę zebranych danych pomiarowych pod kątem wykrywania różnych uszkodzeń silnika. Niewątpliwą zaletą prezentowanego systemu diagnostycznego jest niski koszt jego wykonania, który wynika głównie z zastosowania prostych rozwiązań sprzętowych, połączonych z wydajnym oprogramowaniem diagnostycznym. W roli analizatora diagnostycznego zastosować można dowolne, powszechnie dostępne urządzenie mobilne z systemem Android, np. telefon komórkowy, czy tablet. Takie rozwiązanie pozwoliło ograniczyć koszt całkowity systemu, eliminując konieczność budowania specjalistycznego komputera, wyposażonego dodatkowo w graficzny interfejs użytkownika. Przedstawiony system pomiarowo-diagnostyczny został wykonany w formie prototypowej. Aktualnie trwają jego testy, a oprogramowanie diagnostyczne znajduje się w ciągłej fazie rozwoju i jest na bieżąco udoskonalane.

Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu N N510 637 740.

LITERATURA

- [1] BENBOUZID M.E.H., *A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection*, IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol. 47, No. 5, Oct. 2000, pp. 984–993.
- [2] CARDOSO A.J.M., MENDES A.M.S., CRUZ S.M.A., *The Park's Vector Approach: New Developments in On-Line Fault Diagnosis of Electrical Machines*, Conf. Proc. of SDEMPED '97, France, 1997.
- [3] KOWALSKI Cz.T., PAWLAK M., *Komputerowy system diagnostyczny silnika indukcyjnego*, Przegląd Elektrotechniczny, 2008. R. 84, nr 12, 2008, s. 91–95.
- [4] PAWLAK M., ŻARCZYŃSKI Z., *Przenośny system pomiarowy do diagnostyki silników indukcyjnych*, Prace Naukowe IMNiPE Politechniki Wrocławskiej, Nr 62, Studia i Materiały, Nr 28, 2008.

REMOTE MEASUREMENT SYSTEM OF INDUCTION MOTOR FOR PORTABLE DEVICES WITH ANDROID OS

The paper presents a concept of inexpensive remote measurement system for induction motor fault diagnosis, designed for the portable devices using Android OS. The hardware of system consist two current clamps for stator current measurement, two-channel data acquisition recorder and portable device (mobile phone or PDA) with specialized software. The diagnostic software takes advantage of motor current signature analysis method (MCSA) for detection of rotor and stator faults, voltage unbalance and mechanical load misalignment. All the measuring equipment are compact and battery-operated, that makes it usable in not easy accessible surroundings.