

**Maciej Sułowicz, Arkadiusz Duda, Jakub Zielonka, Jarosław Tulicki, Dariusz Cholewa**  
**Politechnika Krakowska, Kraków**  
**Mirosław Czechowski, Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne S.A. Kraków,**  
**Politechnika Krakowska, Kraków**

## **SYSTEM DIAGNOSTYCZNY DO BEZINWAZYJNEJ OCENY STANU KLATKI WIRNIKA SILNIKÓW INDUKCYJNYCH**

### **DIAGNOSTIC SYSTEM FOR NON-INVASIVE ASSESSMENT OF ROTOR CAGE CONDITION OF INDUCTION MOTORS**

**Streszczenie:** Ocena stanu klatki silników indukcyjnych jest ciągle aktualnym problemem diagnostyki stanu tych maszyn. Na rynku zasadniczo nie ma urządzeń, które mogły by w sposób kompleksowy automatycznie diagnozować uszkodzenia klatek silników zarówno podczas stanu ustalonego w oparciu o metodę MCSA jak i podczas rozruchu wykorzystując analizę przetworzonego przebiegu prądu rozruchowego. Na podstawie wieloletnich doświadczeń, autorów artykułu, w prowadzeniu badań stanu klatek wirnika dla wielu maszyn w różnych gałęziach przemysłu, opracowano urządzenie pomiarowe i specjalistyczne oprogramowanie pozwalające diagnozować różne typy silników indukcyjnych klatkowych podczas rozruchu jak i stanu ustalonego. W artykule przedstawiono sposób pomiaru sygnału diagnostycznego, którym jest prąd stojan. Odwołano się do wiarygodności pomiarów diagnostycznych. Przedstawiono funkcjonalność oprogramowania do pomiarów diagnostycznych i analiz podczas stanu ustalonego i rozruchu. Przedstawiono wyniki wybranych pomiarów diagnostycznych, formy prezentacji wyników oceny stanu oraz przedstawiono przykłady zastosowania opracowanego systemu w badaniach przemysłowych w różnych gałęziach przemysłu.

**Abstract:** The assessment of the cage condition of induction motors is still a current problem in diagnosing the condition of these machines. There are basically no devices on the market that could comprehensively and automatically diagnose damage to motor frames, both during the steady state based on the MCSA method and during start-up using the analysis of the processed inrush current waveform. Based on many years of experience of the authors of the article, in conducting research on the condition of rotor cages for many machines in various industries, a measuring device and specialized software were developed to diagnose various types of squirrel-cage induction motors during start-up and in the steady state. The article presents the method of measuring the diagnostic signal, which is the stator current. The reliability of the diagnostic measurements was referred to. The functionality of the software for diagnostic measurements and analyzes during steady state and start-up is presented. The results of selected diagnostic measurements, forms of presentation of the results of condition assessment and examples of the application of the developed system in industrial research in various branches of industry are presented.

**Słowa kluczowe:** silnik indukcyjny, uszkodzenie klatki wirnika, diagnostyka, monitoring, analiza widmowa, filtracja cyfrowa, zabezpieczenie cyfrowe

**Keywords:** induction motor, rotor cage damage, diagnostics, monitoring, spectral analysis, digital filtration, digital protection

#### **1. Wstęp**

Bezinwazyjna diagnostyka stanu maszyn elektrycznych, szczególnie tych o dużych mocach, pracujących w różnych gałęziach przemysłu od dłuższego czasu nabiera coraz większego znaczenia. Obserwuje się wzrost zainteresowania metodami i narzędziami diagnostycznymi, które w sposób szybki i wiarygodny pozwalają na ocenę stanu maszyn pracujących w różnych warunkach. Ocena stanu klatki silników indukcyjnych jest dobrze rozpoznana i jest jednym z częściej wykonywanych badań diagnostycznych.

Od lat osiemdziesiątych XX wieku przez wiele ośrodków naukowych jest rozwijana ocena stanu klatek wirników silników indukcyjnych w oparciu o metodę MCSA (ang. Motor Current Signature Analysis). Metoda ta bazuje na pomiarze i analizie prądu stojana w stanie ustalonym [1-2]. Od tego czasu można obserwować implementację tej metody w wielu rozwiązaniach technicznych urządzeń czy systemów diagnostycznych. Wraz z rozwojem aparatury pomiarowej, dedykowane urządzenia lub systemy diagnostyczne mają coraz bogatszą funkcjonalność

i zapewniają coraz krótszy czas uzyskania wyniku oraz coraz większą wiarygodność diagnoz stanu dla badanej maszyny [2-4], [7-14], [16-17], [19-25].

Oprócz diagnozowania stanu silników indukcyjnych podczas stanu ustalonego często stosuje się metodę badania stanu klatki wirnika podczas rozruchu [4, 11, 17]. Wykorzystuje się tu najczęściej filtrację cyfrową zarejestrowanego sygnału prądu rozruchowego. Metoda ta jest również jednym z częściej wykonywanych badań diagnostycznych na potrzebę określenia stanu klatki wirnika silnika indukcyjnego.

W dobie rozwiązań zgodnych z filozofią Przemysłu 4.0 aplikacja metod diagnostycznych dla oceny stanu klatki silników indukcyjnych znalazła również implementację w zabezpieczeniach cyfrowych [16-17], [24-25].

Przy wyborze sprzętu do badań diagnostycznych bardzo ważne są kwestie oceny parametrów technicznych urządzeń i przetworników pomiarowych. Bardzo ważna jest znajomość metod diagnostycznych i sposobu przetwarzania sygnałów oraz wiarygodności wykonywanych pomiarów diagnostycznych przy pomocy tej aparatury [5, 6, 10, 18].

W przypadku stosowania kilku różnych metod diagnostycznych również bardzo ważna jest spójna ocena w oparciu o analogiczne kryteria i miary diagnostyczne.

Mając na uwadze wszystkie powyższe uwarunkowania zaprojektowano urządzenie pozwalającą na zaawansowaną ocenę stanu klatki silników indukcyjnych dla stanu ustalonej pracy jak i podczas rozruchu.

Przy ocenie stanu przyjęto jedną spójną metodologię bazującą na decybelowych zależnościach dla metody MCSA zarówno dla stanu ustalonego jak i dla rozruchu.

## 2. Budowa przyrządu pomiarowego

### 2.1. Elementy składowe systemu

System pomiarowy do diagnostyki uszkodzeń klatki wirnika w silnikach indukcyjnych składa się z mini komputera z oprogramowaniem MS Windows, stacji dokującej, karty pomiarowej, dedykowanego oprogramowania, kompletu cewek Rogowskiego (3 szt.) oraz kompletu sond prądowych (3 szt.). Komputer ze stacją dokującą i kartą pomiarową są zabudowane w przenośnej walizie razem z bateriami akumulatorów i ładowarką. Takie rozwiązanie umożliwia wykonywanie pomiarów bez zewnętrznego źródła zasilania.

### 2.2. Diagnostyka klatki wirnika w stanie ustalonym

Badanie polega na analizie widmowej zarejestrowanego prądu, gdzie algorytm wyszukuje w widmie tzw. „wstęgi boczne”, a następnie oblicza wskaźnik uszkodzenia klatki. Rejestracja prądu trwa najczęściej 40s z częstotliwością próbkowania sygnału 10 kHz. W tym czasie silnik powinien być obciążony stałym momentem oporowym tak, żeby wartość skuteczna prądu silnika nie była mniejsza niż 70% wartości prądu znamionowego badanego silnika. Silnik musi być zasilony napięciem znamionowym. Dopuszcza się zasilanie z falownika napięcia pod warunkiem, że generowane napięcie ma stałą częstotliwość i wartość skuteczną podczas pomiaru.

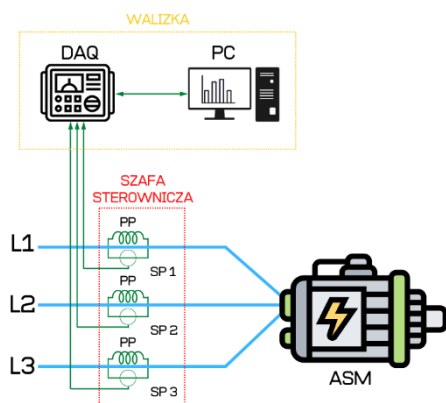
### 2.3. Diagnostyka klatki wirnika podczas rozruchu

Badanie polega na analizie zarejestrowanego prądu stojana podczas rozruchu. Sygnał prądu rozruchowego jest odpowiednio odfiltrowany i przetworzony. Następnie algorytm wyszukuje charakterystyczne symptomy w odfiltrowanym sygnale i na ich podstawie oblicza wskaźnik uszkodzenia klatki. Badanie takie może zostać przeprowadzone pod warunkiem, że rozruch silnika trwa nie mniej niż 2,5s. Silnik należy zasilć napięciem o stałej częstotliwości i wartości skutecznej. Jeżeli rozruch silnika w warunkach znamionowych trwa mniej niż 2,5s, wówczas można wykonać rozruch z obniżonego napięcia lub obciążyć silnik stałym zewnętrznym momentem hamującym. Ma to na celu rozciągnięcie rozruchu w czasie.

Rejestracje prądów stojana dla w/w typów badań stanu klatki wirnika można wykonać na dwa sposoby:

- a) w rozdzielni - przez rejestrację prądu w obwodach wtórnych przekładników prądowych za pomocą sond prądowych (rys.1 i rys.2.),
- b) przy silniku – za pomocą cewek Rogowskiego podpiętych na przewody zasilające w miejscu, gdzie przewody nie są ekranowane (rys.3 i rys.4).

Na rys.1. przedstawiono schemat układu pomiarowego z pomiarem prądów w obwodzie wtórnym przekładników prądowych a na rys.2. przedstawiono widok zamontowanych cęgów podczas pomiarów diagnostycznych na jednej ze stacji prób. Zapięcie sond prądowych w obwodach wtórnych przekładników jest stosunkowo proste i można tę czynność wykonać podczas normalnej pracy silnika.

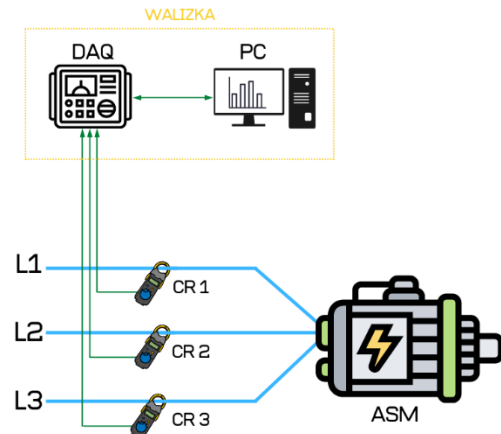


Rys. 1. Schemat układu pomiarowego z wykorzystaniem sond prądowych, gdzie: SP1, SP2, SP3 – sondy prądowe; PP – przekładnik prądowy, ASM – silnik indukcyjny

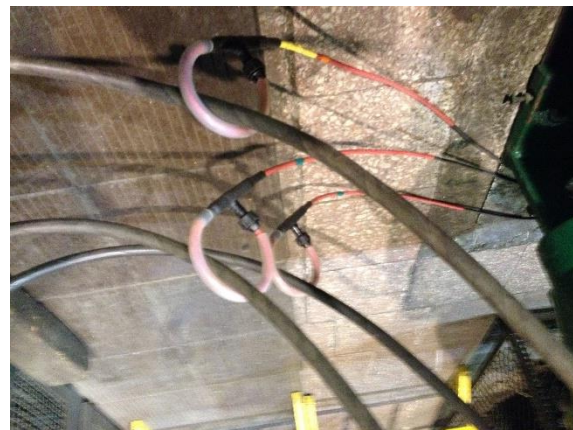


Rys. 2. Widok zamontowanych cęgów do pomiaru prądów w obwodzie wtórnym przekładników prądowych

Na rys.3. przedstawiono schemat układu pomiarowego z pomiarem prądów w obwodzie pierwotnym a na rys.4. przedstawiono sposób zamontowania cewek Rogowskiego podczas pomiarów diagnostycznych na stacji prób. Zamontowanie cewek Rogowskiego na przewody zasilające można wykonać tylko przy wyłączonym silniku. Dla zastosowanych metod diagnostycznych i zakresu częstotliwościowego analizowanych symptomów diagnostycznych obie metody diagnostyczne są w pełni wiarygodne. Sygnał rejestrowany w obwodzie wtórnym jest również w pełni przydatnym sygnałem diagnostycznym. Z analizowanego sygnału wydobywa się charakterystyczne cechy w zakresie częstotliwości do 500Hz. W tym paśmie częstotliwości tłumienia sygnału przez przekładniki są minimalne, nie większe niż ułamek procenta.



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego z wykorzystaniem Cewek Rogowskiego, gdzie: CR1, CR2, CR3 – cewki Rogowskiego; ASM – silnik indukcyjny



Rys. 4. Widok cewek Rogowskiego zapiętych na przewodach zasilających badany silnik

#### 2.4. Kompletny przyrząd pomiarowy z oprogramowaniem do diagnostyki stanu klatki wirników silników indukcyjnych

Na rys. 5. i rys. 6. przedstawiono system pomiarowy i jego elementy składowe.



Rys. 5. Widok wnętrza walizki, w której zostały zabudowane elementy systemu



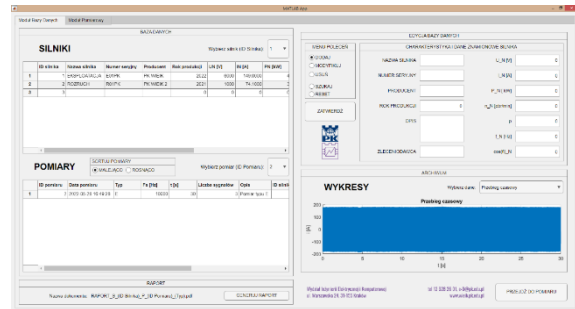
Rys. 6. Widok systemu pomiarowego przygotowanego do pracy – pomiar z użyciem cęgów prądowych

W wersji przedstawionej na rys.5. i rys.6. system składa się z: walizy PELI 1550, układu ładowania, karty pomiarowej NI USB, Laptopa Lenovo ThinkPad, stacji dokującej, sondy prądowych Fluke 80i-110s, cewki Rogowskiego CWT15 oraz przewodów zasilających i zasilaczy.

### 3. Oprogramowanie do analiz diagnostycznych i generacji raportów

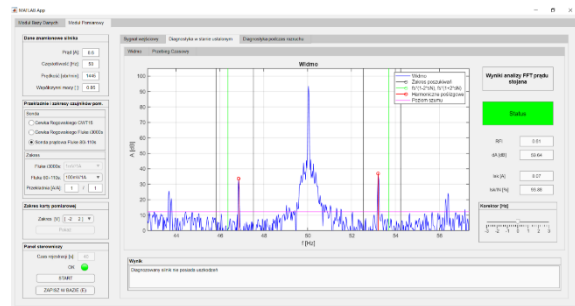
Dopełnieniem omawianego systemu stanowi dedykowane oprogramowanie o nazwie *CageLab*, opracowane przez autorów artykułu. Oprogramowanie służy do zbierania danych pomiarowych, analizy i przygotowania raportów z wynikami badań. Funkcje oprogramowania umożliwiają wyznaczenie aktualnych wartości wskaźnika diagnostycznego i automatyczną ocenę stanu badanych maszyn. Aplikacja podzielona została na dwa moduły:

- Moduł BAZA DANYCH - w nim użytkownik ma dostęp do bazy danych zawierającej dane badanych silników wraz z dodatkowymi opisami oraz zarchiwizowane wcześniej wykonane pomiary dla tych silników. Użytkownik ma możliwość dowolnej edycji danych dotyczących silników. Dodatkowo użytkownik może podejrzeć każdy zmierzony sygnał, który został zapisany w bazie danych na wykresie, może ocenić jego jakość. Widok okna aplikacji tego modułu przedstawiono na rys.7. Pozostałą funkcjonalnością jest możliwość generowania raportu dotyczącego wybranego pomiaru diagnostycznego zawierającego zobrazowanie trendu zmiany współczynnika RFI/DRFI na podstawie poprzednio wykonanych pomiarów (rys 11. oraz rys. 12).



Rys. 7. Widok okna modułu BAZA DANYCH

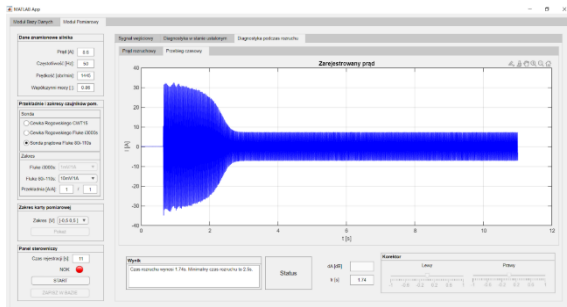
- Moduł POMIAROWY – moduł ten umożliwia przeprowadzenie pomiaru oraz analizę zmierzonych sygnałów podczas stanu ustalonego oraz w trakcie rozruchu. Diagnostyka w stanie ustalonym dostarcza wyniki analizy FFT zarejestrowanego prądu stojana. Okno tego modułu aplikacji *CageLab* przedstawiono na rys.8.



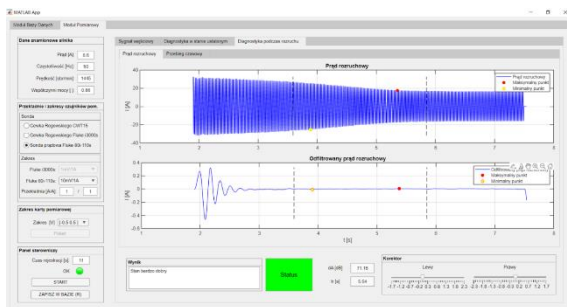
Rys. 8. Przykładowy wynik diagnostyki w stanie ustalonym – widmo sygnału diagnostycznego

Algorytm diagnostyczny automatycznie wyszukuje w zakresie częstotliwości ograniczonych czarnymi liniami, harmoniczne poślizgowe, które następnie są zaznaczane w kolorze czerwonym w oknie aplikacji. Zielonymi liniami zostały zaznaczone miejsca, gdzie powinny się znajdować harmoniczne poślizgowe dla przypadku pracy silnika przy poślizgu znamionowym (rys.8).

W przypadku diagnostyki podczas rozruchu, przed rozpoczęciem pomiaru należy wprowadzić czas rejestracji. Czas rejestracji powinien obejmować moment od rozpoczęcia rejestracji do ustalenia się prędkości wirnika po dokonaniu rozruchu. Po rejestracji przebiegu prądu rozruchowego aplikacja dokona analizy zarejestrowanego sygnału, jeżeli rozruch silnika będzie większy niż 2.5 s (czas liczony od osiągnięcia przez prąd wartości maksymalnej do znamionowej). Widok aplikacji z przykładowym przebiegiem prądu rozruchowego przedstawiono na rys.9 a wynik analizy na rys.10.



Rys. 9. Przykładowy przebieg prądu stojana podczas rozruchu



Rys. 10. Przykładowy wynik analizy prądu rozruchowego

Na rys. 10 dla wyników analizy prądu stojana podczas rozruchu zaznaczono charakterystyczne punkty decydujące o końcowym wyniku diagnozy. Algorytm wyszukuje charakterystyczne punkty w odfiltrowanym przebiegu prądu rozruchowego w przedziale czasu ograniczonym dwiema czarnymi przerywanymi liniami. Na rys. 11 i rys.12 przedstawiono przykładowe raporty wygenerowane z aplikacji *CageLab*.

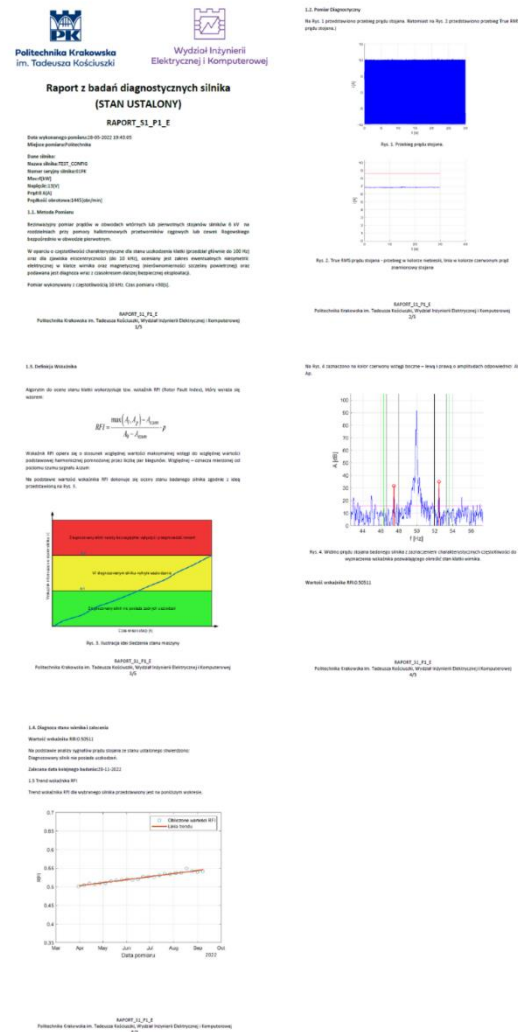
Dla stanu ustalonego dla raportu przedstawionego na rys. 11 zaznaczono kolorem wstęgi bocznej o amplitudach odpowiednio  $A_l$  i  $A_p$ , które służą do wyznaczenia wskaźnika RFI (Rotor Fault Index) wyrażonego wzorem [25, 26]:

$$RFI = \frac{\max(A_l, A_p) - A_{szum}}{A_0 - A_{szum}} \cdot p \quad (1)$$

gdzie:  $p$  - liczba par biegunów a  $A_{szum}$  - oznacza poziomu szumu sygnału diagnostycznego. Wskaźnik ten służy do oceny stanu klatki wirnika podczas pracy silnika w stanie ustalonym. Do oceny stanu silnika podczas rozruchu zastosowano drugi wskaźnik *DRFI* (Dynamic Rotor Fault Index), który po odpowiednim wyselekcjonowaniu amplitud w sygnałach odfiltrowanego prądu rozruchowego ( $A$ ) i prądu rozruchowego ( $A_0$ ) jest obliczany na podstawie wyrażenia [26]:

$$DRFI = -20 \cdot \left[ \log_{10} \left( \frac{A}{A_0} \right) - \log_{10} \left( \frac{A_0}{A_0} \right) \right] \quad (2)$$

Przykładowy raport dla oceny stanu silnika podczas rozruchu przedstawiono na rys.12.



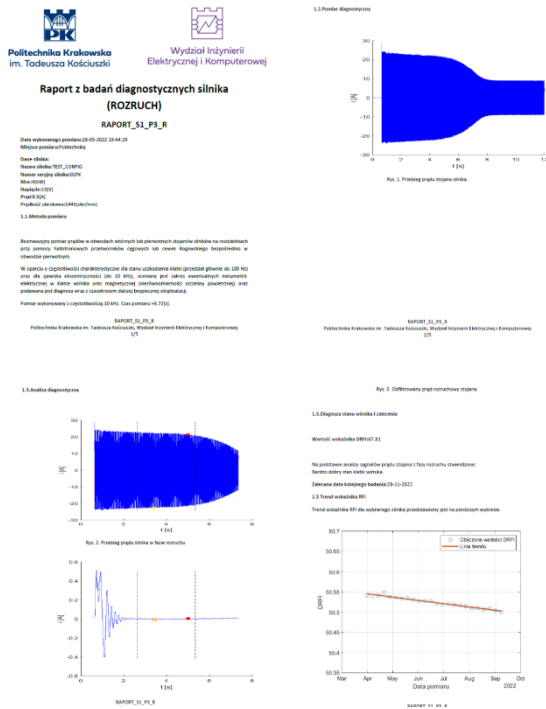
Rys. 11. Raport dla stan ustalonej pracy silnika

Wartość liczbową wyznaczonego wskaźnik *DRFI* można odnieść do normy *MCSA* i na podstawie tabeli 1 wstępnie określić stan klatki wirnika.

Tabela 1. Wartości graniczne zgodne z normą *MCSA* [25, 26]

Wartość wskaźnika diagnostycznego [dB]	Stan wirnika - alarm
60	Bardzo dobry
54 do 60	Dobry
48 do 54	Zadawalający

42 do 48	Wystąpienie połączeń wysokorezystancyjnych, początek uszkodzenia klatki wirnika
36 do 42	Uszkodzenie prętów klatki wirnika
30 do 36	Łączne uszkodzenie prętów i pierścieni zwierających



Rys. 12. Raport oceny stanu klatki wirnika badanego silnika dla pomiaru wykonanego podczas rozruchu

Ostatecznie do oceny diagnostycznej zarówno dla stanu ustalonego jak i dla stanu rozruchu przyjmuje się wartości graniczne zgodne z normą MCSA [25, 26] zestawione w tabeli 1.

#### 4. Testy urządzenia i możliwość zastosowania go w pomiarach diagnostycznych w przemyśle

Urządzenie w licznych testach sprawdzono w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych. Pozwoliło to na dobranie optymalnych nastaw w module rejestracji i analizy danych.

Pierwsze badania przeprowadzono w laboratorium badawczym Politechniki Krakowskiej, kolejne badania prowadzono w przemyśle na stacji prób silników dużej mocy nisko i wysokonapięciowych. Prowadzono również bada-

nia na stanowisku pracy kilku silników w różnych gałęziach przemysłu.

Na rys. 13 i rys.14 przedstawiono przykładowe zastosowania systemu diagnostycznego. Pierwszym najszerzym przykładem zastosowania systemu diagnostycznego do oceny stanu klatki silników indukcyjnych są pomiary diagnostyczne wykonane w obwodach wtórnych przekładników prądowych (rys.13). Na drugiej części rysunku podano widok panelu zabezpieczenia cyfrowego BEL\_plus z zaimplementowanymi algorytmami oceny diagnostycznej do stanu klatki silnika. Algorytmy te są w pełni kompatybilne z algorytmami oceny zaimplementowanymi w opisanym w artykule systemie diagnostycznym. Algorytmy te zostały również zaprojektowane przez autorów artykułu.



Rys. 13. Widok na urządzenie przygotowane do rejestracji i oceny stanu klatki silnika dużej mocy na stanowisku pracy w przemyśle (zdjęcie po lewej), testy zabezpieczenia BEL\_plus (zdjęcie po prawej)

Na rys. 14. przedstawiono przykład zastosowania systemu w badaniach silników indukcyjnych napędów wagonów tramwajowych, pomiary z użyciem cewek Rogowskiego.



Rys. 14. Widok na komponenty systemu diagnostycznego podczas badań silników elektrycznych napędów wagonów tramwajowych

Powyższe przykłady to jedne z nielicznych możliwości zastosowań opracowanego systemu diagnostycznego.

## 5. Podsumowanie

Przedstawione rozwiązanie przenośnego systemu diagnostycznego do oceny stanu klatki silników indukcyjnych jest propozycją przyrządu dla służb utrzymania ruchu zajmujących się eksploatacją silników indukcyjnych w różnych gałęziach przemysłu. Również jest niezbędnym urządzeniem diagnostycznym dla personelu prowadzącego badania na stacji prób w zakładach remontowych maszyn elektrycznych. System diagnostyczny może być również użyty przy innych testach diagnostycznych silników indukcyjnych w wielu aplikacjach technicznych tych maszyn.

Zaproponowane rozwiązanie sprzętowe, z wysokiej klasy kartą pomiarową, aktualnie dedykowane tylko do oceny stanu klatki wirnika, zostanie w przyszłości znacznie rozbudowane przez autorów o nową funkcjonalność do diagnozowania innych uszkodzeń.

Poszerzenie funkcjonalności oprogramowania oraz wyposażenie urządzenia w dodatkowe przetworniki pomiarowe, pozwoli na uzyskanie rozszerzonej funkcjonalności oraz funkcji diagnostycznych czy specjalistyczne procedury diagnozowania stanu maszyn elektrycznych.

Wartą do podkreślenia zaletą przedstawionego systemu jest pełna kompatybilność algorytmów diagnostycznych zaimplementowanych w systemie diagnostycznym z algorytmami zaimplementowanymi w cyfrowym zabezpieczeniu BEL\_plus [25-26]. Autorzy artykułu opracowali w pełni zgodne procedury diagnozowania uszkodzeń dla systemu diagnostycznego i dla zabezpieczenia cyfrowego. Możliwości pomiarowe i funkcjonalność dedykowanego oprogramowania zaimplementowanego w mobilnym systemie diagnostycznym pozwala na rozszerzone testowanie funkcji zabezpieczeń cyfrowych. W przypadku sygnalizowania złego stanu klatki silnika przez zabezpieczenie cyfrowe w sposób ciągły kontrolujące pracę silnika, można przeprowadzić bardziej dokładne testy diagnostyczne przy pomocy przenośnego systemu diagnostycznego opisanego w tym artykule. Dzięki wcześniej podjętym działaniom prewencyjnym można będzie z odpowiednio dużym wyprzedzeniem właściwie zaplanować działania remontowe i naprawcze w przypadku stwierdzenia pojawiającego się uszkodzenia silnika.

Odpowiednio wcześniej podjęte działania pozwolą uniknięcia awarii czy poważnego uszkodzenia eksploatowanego silnika.

## 6. Literatura

- [1]. G.B. Klimanet, et al. "Methods of motor current signature analysis", *Elect. Mach. Power Syst.*, Vol. 20, No. 5, 1992.
- [2]. D.G. Dorrell, W.T. Thomson, S. Roach "Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic air-gap eccentricity in 3-phase induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33(1), str. 24-34, 1997.
- [3]. 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, str. 987-991, 2000.
- [4]. W. Rams, J. Rusek "Praktyczna diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych", *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 68, str. 1-5, 2004.
- [5]. S. Szymaniec "Aspekty metrologiczne diagnostyki prądowej silników elektrycznych", *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 68, str. 7-12, 2004.
- [6]. S. Szymaniec "Diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych z wykorzystaniem cewek Rogowskiego", *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 72, str. 167-172, 2005.
- [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]. M. Sułowicz, T. Węgiel, D. Borkowski, K. Weinreb "Specialized diagnostic system for induction motors", *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 4, str. 285-291, 2010.
- [9]. S. Szymaniec "Diagnostyka eksploatacyjna uszkodzeń napędów elektrycznych w przemyśle", *Napędy i Sterowanie*, nr 6, str. 84-89, 2011.
- [10]. P. Paduch, S. Szymaniec "Aparaturowe i metrologiczne aspekty diagnostyki maszyn elektrycznych w oparciu o sygnał prądowy", *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 90, str. 69-74, 2011.
- [11]. 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, str. 77-83, 2013.
- [12]. J. Dwojak, S. Szymaniec "Diagnostyka eksploatacyjna zespołów maszynowych w energetyce", *Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej*, Opole 2013.
- [13]. M. Pawlak, Z. Żarczyński "Rozproszony system pomiarowy do diagnostyki przemysłowych napędów elektrycznych", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 98, str. 39-44, 2013.
- [14]. M. Pawlak "Przenośny analizator diagnostyczny do wykrywania uszkodzeń stojana i wirnika w silnikach indukcyjnych", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 100, str. 177-182, 2013.

- [15]. L. Swędrowski "Pomiary w diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych", *Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej*, 2013.
- [16]. P. Ostojic, A. Banerjee, D. C. Patel, W. Basu and S. Ali "Advanced Motor Monitoring and Diagnostics", in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 5, str. 3120-3127, Sept.-Oct. 2014.
- [17]. M. Rad "Diagnostyka klatki we współczesnych zabezpieczeniach silników indukcyjnych", *Napędy i Sterowanie*, R18, nr 5, str. 68-70, 2016.
- [18]. M. Sułowicz, J. Petryna, K. Weinreb, A. Duda, J. Tulicki "Ocena wiarygodności i przydatności sygnałów diagnostycznych do bezinwazyjnej oceny stanu maszyn elektrycznych. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty problemowe*. nr 111, str. 139-146, 2016.
- [19]. M. Sułowicz, A. Duda, J. Petryna, K. Guziec "System pomiarowo-diagnostyczny do bezinwazyjnej diagnostyki stanu wirnika silników indukcyjnych", *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 114, str. 169-175, 2017.
- [20]. A. Juszczak "Diagnostyka silników wykorzystująca wielkości pomiarowe aparatury zabezpieczeniowej", *Napędy i Sterowanie*, nr 9, str. 100-110, 2018.
- [21]. M. Sułowicz, A. Duda, J. Petryna, K. Guziec "System pomiarowo-diagnostyczny do bezinwazyjnej diagnostyki stanu wirnika i wyznaczania parametrów pracy silników indukcyjnych", *Napędy i Sterowanie*, nr 5, str. 56-65, 2018.
- [22]. M. Sułowicz, M. Czechowski "Diagnostyka silników indukcyjnych klatkowych w układach napędowych wagonów tramwajowych", *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 119, str. 189-195, 2018.
- [23]. T. Glinka, S. Szymaniec "Diagnostyka maszyn i urządzeń – uwagi ogólne", *Napędy i Sterowanie*, nr 5, str. 36-49, 2020.
- [24]. A. Duda, M. Sułowicz, J. Tulicki, T. Węgiel, M. Iwiński "Skuteczne algorytmy diagnostyki stanu klatki silników indukcyjnych zaimplementowane w nowoczesnym uniwersalnym zabezpieczeniu cyfrowym", *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 126, str. 137-142, 2021.
- [25]. A. Duda, M. Sułowicz, J. Tulicki, T. Węgiel, M. Iwiński "Nowoczesne uniwersalne zabezpieczenia cyfrowe wyposażone w algorytmy do diagnostyki stanu klatki silników indukcyjnych", *Napędy i Sterowanie*, nr 12, str. 48-55, 2021.
- [26] <http://www.equipmenthealth.com/mcsa.htm>

### Autorzy

dr hab. inż. Maciej Sułowicz,  
prof. PK [maciej.sulowicz@pk.edu.pl](mailto:maciej.sulowicz@pk.edu.pl)  
dr inż. Arkadiusz Duda  
[arkadiusz.duda@pk.edu.pl](mailto:arkadiusz.duda@pk.edu.pl)  
mgr inż. Jakub Zielonka  
[jakub.zielonka@doktorant.pk.edu.pl](mailto:jakub.zielonka@doktorant.pk.edu.pl)  
mgr inż. Jarosław Tulicki  
[jaroslaw.tulicki@pk.edu.pl](mailto:jaroslaw.tulicki@pk.edu.pl)  
mgr inż. Dariusz Cholewa  
[dariusz.cholewa@pk.edu.pl](mailto:dariusz.cholewa@pk.edu.pl)  
mgr inż. Mirosław Czechowski  
[miroslaw.czechowski@doktorant.pk.edu.pl](mailto:miroslaw.czechowski@doktorant.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](mailto:mczechow@mpk.krakow.pl)  
Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne S.A.  
30-347 Kraków, ul. Jana Brożka 3

### Informacje dodatkowe

Opisany w artykule przyrząd pomiarowy wykonano w ramach pracy zleconej dla firmy Elsta Sp. z o.o. w ramach zlecenia pt.: *Opracowanie przyrządu pomiarowego do oceny diagnostycznej silników elektrycznych na potrzeby realizacji zadania w Centrum Badawczo-Rozwojowe Maszyn Elektrycznych w Zakładzie Maszyn Elektrycznych EMIT S.A.*