

## Streszczenie

W rozprawie doktorskiej przedstawiono koncepcję modelu nowatorskiego czujnika drgań wykorzystującego technologię MEMS (z ang. Micro-Electro-Mechanical-System) do oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych w rozproszonych systemach monitorowania i diagnostyki. Rozprawa ma charakter interdyscyplinarny i przedstawia szereg badań symulacyjnych i badań rzeczywistych prototypów nowego czujnika. Badania wykonane w pracy doktorskiej miały wykazać, czy możliwe jest takie zaprojektowanie cyfrowego czujnika wykorzystującego technologię MEMS, aby można było nim zastąpić znacznie mniej elastyczne i problematyczne w produkcji, analogowe czujniki drgań wymagające skomplikowanych układów akwizycji danych.

Praca posiada kontekstową część teoretyczną dotyczącą wybranych aspektów systemów monitorowania i diagnostyki maszyn wirnikowych oraz opis komponentów drganiowych generowanych przez maszyny wirnikowe, dalej część teoretyczną określającą funkcjonalne wymagania projektowe dla nowego czujnika oraz część praktyczną obejmującą szczegółowe badania kolejnych modeli czujnika na poziomie analitycznym oraz ostateczną weryfikację spełnienia założeń projektowych (szczególnie wymagań przemysłowych) na sygnałach drgań zarejestrowanych na obiekcie rzeczywistym.

Praca doktorska była częściowo realizowana w ramach projektu badawczego nr POIR.04.01.04-00-0080/19 pt. "Nowa era FTF dla systemów oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych - od urządzeń on-site do serwerów Industry 4.0" współrealizowanego przez Akademię Górniczo-Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie oraz przy współpracy z amerykańskimi firmami Analog Devices Inc. oraz The Machine Instrumentation Group, Ltd. Prace rozwojowe zakończone opracowaniem prototypowej wersji czujników drgań wykonywane były głównie przez firmę AMC Tech Sp. z o.o., wobec czego w pracy doktorskiej opis tej części jest odpowiednio ograniczony.

Ostateczna forma pracy doktorskiej ma charakter modułowy, gdyż część prac miała charakter badań B+R, na podstawie których uzyskano nową wiedzę. Dotyczy to głównie samej konstrukcji mechanicznej czujnika, projektu informatyczno-elektronicznego architektury komunikacji oraz modelu rozwoju oprogramowania. W ramach opracowywania części sprzętowej nowego czujnika, prace badawcze realizowane były z wykorzystaniem układów scalonych nowej generacji, których opis literaturowy był znikomy. Wiele obszarów, zwłaszcza w kontekście wpływu zastosowanych materiałów na złożoną charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową odpowiedzi częstotliwościowej układu było jednocześnie badane poprzez symulacje, klasyczne metody analityczne oraz specjalistyczne pomiary empiryczne. Część przyjętych rozwiązań w obszarze komunikacji została podyktowana wymogami przemysłowymi pod kątem realizacji zadań systemów oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych (wytyczne Polskiego Komitetu Organizacyjnego oraz ISO). Z kolei model rozwoju oprogramowania wymaga wielokrotnej aktualizacji z uwagi na bieżący rozwój narzędzi wspomagających oprogramowanie, przy jednoczesnym zapewnieniu możliwości utrzymywania kodu źródłowego. W konsekwencji, w ramach realizacji pracy doktorskiej, kandydat zagłębił się dość szczegółowo w zagadnienia związane z rozwojem oprogramowania na systemach wbudowanych, znajomością różnych języków oprogramowania oraz programowania komunikacji typu multi-platform w czasie rzeczywistym.

Główne problemy badawcze podjęte w pracy doktorskiej dotyczyły projektowania topologii architektury czujnika, hybrydowej analizy charakterystyk amplitudowo-

częstotliwościowych odpowiedzi częstotliwościowych czujnika (z ang. FRF - Frequency Response Function) oraz rozwoju dedykowanych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów drgań w celu wyznaczenia wartości skalarnych wskaźników oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych oraz opracowania metodologii zautomatyzowanego rozwoju oprogramowania. Najważniejszym zagadnieniem dotyczącym głównego problemu badawczego było opracowanie sposobu na uzyskanie wymaganych własności mechanicznych czujnika (jako całego systemu) podczas kolejnych modyfikacji w zakresie architektury układów elektronicznych i interfejsów komunikacji, przy zachowaniu wymaganej funkcjonalności diagnostycznej (tj. funkcji obliczeniowych). Od samego początku w pracy doktorskiej przyjęto metodologię projektowania mechatronicznego wykorzystującego tablice morfologiczne. Kolejne wersje poszczególnych rozwiązań testowano różnymi metodami. W wyniku prowadzonych badań zaproponowano model koncepcji czujnika, który spełnił stawiane wymagania zachowując względną łatwość wykonania (cecha bardzo istotna z punktu widzenia kosztów produkcji). Poza pracami o charakterze badawczym, charakter pracy doktorskiej wymagał dość rozległego studium istniejących rozwiązań w zakresie platform wbudowanych, systemów monitorowania i diagnostyki maszyn, analizy modalnej oraz chronionych rozwiązań dotyczących się czujników drgań (zwłaszcza z uwagi na prace przygotowawcze w ramach udzielonego patentu dla kandydata).

W wyniku przeprowadzonych badań naukowych potwierdzono główną tezę pracy doktorskiej, demonstrując porównywalną skuteczność nowego czujnika wykorzystującego technologię MEMS do skuteczności typowych przemysłowych piezoelektrycznych czujników drgań w ramach możliwości detekcji badanych uszkodzeń maszyn wirnikowych, zarówno w niskich częstotliwościach (zgodnie z ISO 20816), jak i w wysokich pasmach częstotliwości strukturalnych obejmujących lokalne uszkodzenia łożysk tocznych. Jednocześnie, jak wykazano w pracy, alternatywne zastosowanie cyfrowych czujników drgań niesie za sobą szereg nowych możliwości w zakresie łatwiejszej skalowalności i większej elastyczności architektury rozproszonych systemów monitorowania i diagnostyki maszyn, zarówno pod kątem zastosowań w prostych układach PLC, jak i w nowoczesnych realizacjach w ramach Industry 4.0. Najważniejsze naukowe wyniki pracy doktorskiej obejmują patent PL 238650 B1 pt. „Sposób i urządzenie pomiarowo-transmisyjne do akwizycji danych pomiarowych układów mechatronicznych”, publikacje w czasopiśmie Diagnostyka oraz wystąpienia konferencyjne na Ogólnopolskim Sympozjum Diagnostyka Maszyn. Ponadto, niektóre fragmenty pracy doktorskiej zrealizowano w ramach obecnie (2023 rok) realizowanego projektu badawczego nr POIR.01.01.01-00-0052/22 pt. "Cyfryzacja Utrzymania Ruchu w elastycznym modelu subskrypcyjnym", którego istotą jest zwiększenie poziomu cyfryzacji przemysłu maszynowego poprzez opracowanie systemu umożliwiającego w pełni autonomiczne wykrywanie uszkodzeń maszyn, na podstawie analizy danych przesyłanych z zakładu przemysłowego do oprogramowania serwerowego, w nowoczesnej architekturze IIoT (Industrial Internet of Things), dla której nowoczesne cyfrowe czujniki drgań wykorzystujące technologię MEMS są bardzo ważnym elementem.

**Słowa kluczowe:** nowoczesne cyfrowe czujniki drgań, architektura systemów wbudowanych, przetwarzanie sygnałów, biblioteka CMSIS.DSP, projektowanie mechatroniczne, zautomatyzowane generowanie kodu źródłowego, Cortex M4, analiza symulacyjna, analiza modalna, diagnostyka maszyn wirnikowych, wskaźniki diagnostyczne, IIoT.

29.09.2023r.

Michał Stencel

## Abstract

The dissertation presents a conceptual model of a novel vibration sensor using MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System) technology for condition assessment of rotating machinery in distributed monitoring and diagnostic systems. The dissertation is interdisciplinary in nature and presents a series of simulation studies and real-world tests of prototypes of the new sensor. The research carried out in the dissertation was intended to demonstrate whether it is possible to design a digital sensor using MEMS technology in such a way that it can be used to replace much less flexible and problematic in production, analog vibration sensors requiring complex data acquisition systems.

The paper has a contextual theoretical part on selected aspects of monitoring and diagnostic systems for rotating machinery and a description of the vibration components generated by rotating machinery, further a theoretical part defining the functional design requirements for the new sensor, and a practical part including detailed testing of successive sensor models at the analytical level and final verification of the fulfillment of design assumptions (especially industrial requirements) on vibration signals recorded on the real object.

The dissertation was partially carried out within the framework of the research project No. POIR.04.01.04-00-0080/19 entitled "New era of FTF for rotating machinery condition assessment systems - from on-site devices to Industry 4.0 servers" co-implemented by the AGH University of Science and Technology in Krakow and in cooperation with the American companies Analog Devices Inc. and The Machine Instrumentation Group, Ltd. The development work culminating in the prototype version of the vibration sensors was carried out mainly by AMC Tech Sp. z o.o., so the description of this part in the dissertation is accordingly limited.

The final form of the dissertation is modular, as part of the work was R&D, based on which new knowledge was obtained. This mainly concerns the mechanical design of the sensor itself, the computer-electronic design of the communication architecture and the software development model. As part of the development of the hardware part of the new sensor, research work was carried out using new-generation integrated circuits, the literature description of which was scarce. Many areas, especially in the context of the influence of the materials used on the complex amplitude-frequency characteristics of the frequency response of the system were simultaneously studied through simulations, classical analytical methods and specialized empirical measurements. Some of the solutions adopted in the area of communication were dictated by industrial requirements in terms of the implementation of the tasks of systems for assessing the technical condition of rotating machinery (guidelines of the Polish Organizing Committee and ISO). In turn, the software development model requires multiple updates due to the ongoing development of software support tools, while ensuring the ability to maintain the source code. Consequently, in the course of completing the dissertation, the candidate has gone into quite a bit of detail on software development on embedded systems, knowledge of various software languages and programming of real-time multi-platform communication.

The main research problems undertaken in the dissertation were the design of the topology of the sensor architecture, the hybrid analysis of the amplitude-frequency response characteristics of the sensor (FRF - Frequency Response Function), and the development of dedicated methods for digital processing of vibration signals to determine the values of scalar indices for assessing the technical condition of rotating machinery and the development of a



methodology for automated software development. The most important issue concerning the main research problem was the development of a way to obtain the required mechanical properties of the sensor (as a whole system) during subsequent modifications in terms of electronic circuit architecture and communication interfaces, while maintaining the required diagnostic functionality (i.e., computational functions). From the very beginning, the dissertation adopted a mechatronic design methodology using morphological tables. Successive versions of each solution were tested using various methods. As a result of the research, a model of the sensor concept was proposed, which met the requirements while maintaining relative ease of manufacture (a feature very important from the point of view of production costs). In addition to the work of a research nature, the nature of the dissertation required a rather extensive study of existing solutions in the field of embedded platforms, machine monitoring and diagnostics systems, modal analysis and protected solutions pertaining to vibration sensors (especially in view of the preparatory work under the granted patent for the candidate).

As a result of the conducted scientific research, the main thesis of the dissertation was confirmed, demonstrating the comparable effectiveness of the new sensor using MEMS technology to that of typical industrial piezoelectric vibration sensors within the framework of the ability to detect investigated faults in rotating machinery, both at low frequencies (according to ISO 20816) and in high structural frequency bands covering local rolling bearing faults. At the same time, as demonstrated in the paper, the alternative use of digital vibration sensors brings with it several new opportunities for easier scalability and greater flexibility in the architecture of distributed machine monitoring and diagnostic systems, both in terms of applications in simple PLC systems and in modern implementations within Industry 4.0. The most important scientific results of the dissertation include patent PL 238650 B1 entitled: "Method and measurement-transmission device for the acquisition of measurement data of mechatronic systems", publications in the journal Diagnostics, and conference presentations at the National Symposium on Machine Diagnostics. In addition, selected parts of the realized doctoral thesis were completed as part of the currently (2023) executed research project No. POIR.01.01.01-00-0052/22 entitled. "Digitization of Maintenance in a Flexible Subscription Model", the essence of which is to increase the level of digitization of the machinery industry through the development of a system enabling fully autonomous detection of machine faults, based on the analysis of data sent from the industrial plant to the server software, in the modern IIoT (Industrial Internet of Things) architecture, for which modern digital vibration sensors using MEMS technology are a very important element.

**Key words:** modern digital vibration sensors, embedded systems architecture, signal processing, CMSIS.DSP library, mechatronic design, automated code generation, Cortex M4, simulations, modal analysis, rotary machinery diagnostics, machine health indicators, IIoT.

29.09.2023 r.  
Mojca Steneli