

System wibrodiagnostyczny dla mikroturbiny parowej ORC o mocy 100 kW

Vibrodiagnostic system for an orc vapour micro-turbine with a power of 100 kW

ARTUR ANDREARCZYK
GRZEGORZ ŻYWICA
MAŁGORZATA BOGULICZ
PAWEŁ BAGIŃSKI *

Materiały z XX SKWPIE, Jurata 2016 r.
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.102

W artykule zaprezentowano system wibrodiagnostyczny opracowany dla prototypowej mikroturbiny o mocy elektrycznej 100 kW pracującej w obiegu ORC. Opisano system wibrodiagnostyczny wraz z aplikacją pomiarowo-monitorującą opracowaną w środowisku LabVIEW oraz test aplikacji na stanowisku badawczym. Przedstawiono także ogólną charakterystykę monitorowanej mikroturbiny.
SŁOWA KLUCZOWE: wibrodiagnostyka turbin, system pomiarowy, monitoring, mikroturbina

The article presents a vibrodiagnostic system that was developed for a prototypical micro-turbine with the electric capacity of 100 kW operating in an ORC installation. The system with dedicated measuring and monitoring software (developed in LabVIEW programming environment) and the software testing process on the test rig were described. The overall characteristics of the micro-turbine has been also presented.

KEYWORDS: vibrodiagnostics of turbines, measurement system, monitoring, micro-turbine

Prezentowany system wibrodiagnostyczny powstał w związku z koniecznością monitorowania stanu technicznego prototypowej mikroturbiny parowej ORC, o mocy elektrycznej do ok. 100 kW. W skład systemu wchodzi: stacja operatorska, komputer pomiarowy oraz czujniki pomiarowe i okablowanie [1÷3]. System opracowano w oparciu o graficzne środowisko programowania LabVIEW w wersji 2014 firmy National Instruments.

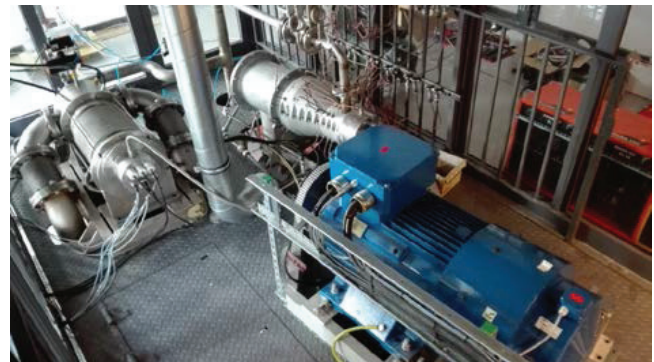
Opisywany system diagnostyczny został przygotowany do instalacji na docelowym obiekcie, na którym trwają prace przygotowawcze do rozruchu. Wstępne testy funkcjonalne systemu zostały wykonane na stanowisku badawczym dynamicznej turbiny, symulującym pracę mikroturbiny.

Układ kogeneracyjny ORC wraz z mikroturbiną oraz system diagnostyczny opracowano i zbudowano w IMP PAN, w ramach Strategicznego Programu Badań Naukowych i Prac Rozwojowych – Zadania Badawczego nr 4 pt. „Opracowanie zintegrowanych technologii wytwarzania paliw i energii z biomasy, odpadów rolniczych i innych”.

Charakterystyka prototypowej mikroturbiny parowej

Obiektem docelowym dla omawianego systemu wibrodiagnostycznego jest siedmiostopniowa mikroturbina osiowa, o maksymalnej mocy 100 kW, przy mocy cieplnej układu ORC do 0,5 MW. Czynnikiem roboczym jest czynnik niskowrzący MDM z grupy olejów silikonowych. Mikroturbina posiada dwa węzły łożyskowe z łożyskami tocznymi. W węzle łożyskowym

od strony dolotu zastosowano dwa łożyska skośne, natomiast w drugim – łożysko poprzeczne. Tarcze wirnikowe wszystkich stopni znajdują się pomiędzy węzłami łożyskowymi. Na końcu wału, od strony stopni wysokoprężnych, znajduje się wolny czop z wpustem, służący do przekazywania momentu obrotowego z mikroturbiny do asynchronicznego generatora za pośrednictwem dwustopniowej przekładni pasowej. Wirnik mikroturbiny umieszczono w szczelnym korpusie. Na rys. 1 pokazano zdjęcie monitorowanej mikroturbiny w laboratorium IMP PAN w Gdańsku.



Rys. 1. Zdjęcie mikroturbiny o mocy 100 kW w laboratorium IMP PAN [3]

Analiza dynamiczna przeprowadzona dla omawianej turbiny wykazała, że jej wirnik jest podkrytyczny [4, 5]. Przy wymuszeniu układu siłą dynamiczną wynikającą z niewyważenia, o częstotliwości zgodnej z częstotliwością obrotową, pierwsza prędkość rezonansowa układu występowała przy prędkości ok. 11 000 obr/min. Jednak w układzie rzeczywistym nie można wykluczyć wymuszeń o wyższych częstotliwościach, co może doprowadzić do wzbudzenia drgań własnych układu. Przeprowadzona analiza wykazała również możliwość wzbudzenia drgań własnych generatora prądu. Opracowany system diagnostyczny ma umożliwić stałe monitorowanie i bieżącą ocenę stanu dynamicznego maszyny, w celu wczesnego wykrywania problemów dynamicznych, defektów i zapobiegania ich propagacji.

Koncepcja systemu wibrodiagnostycznego

Omawiany system zaprojektowano w Zakładzie Dynamiki i Diagnostyki Turbin IMP PAN z przeznaczeniem do: diagnostyki, monitorowania stanu dynamicznego w czasie rzeczywistym oraz akwizycji, wizualizacji i archiwizacji wyników pomiarów. Jego architekturę oparto na schemacie powszechnie stosowanym w systemach diagnostycznych maszyn wirnikowych [6÷7], a punkty pomiarowe zostały określone na podstawie dotychczasowych doświadczeń zespołu badawczego [8÷9].

W skład systemu wchodzi:

- stacja operatorska (SO) – komputer klasy PC,

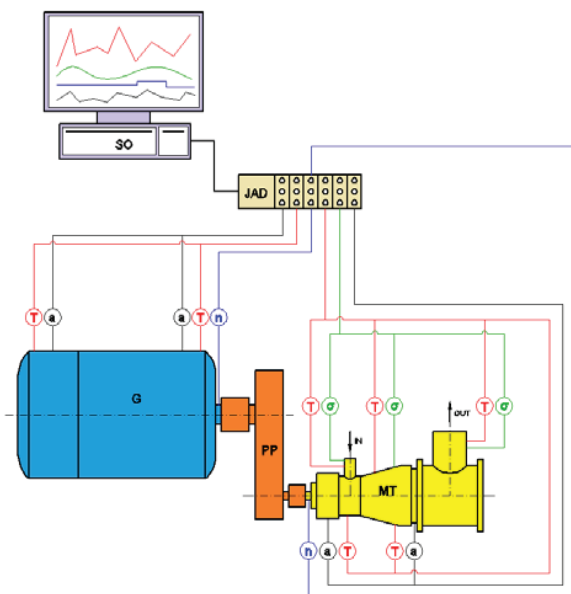
* Mgr inż. Artur Andrearczyk (aandrearczyk@imp.gda.pl) – Politechnika Gdańska; dr inż. Grzegorz Żywica (gzywica@imp.gda.pl); mgr Małgorzata Bogulicz (bogulicz@imp.gda.pl); mgr inż. Paweł Bagiński (pbaginski@imp.gda.pl) – Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk

- jednostka akwizycji danych pomiarowych (JAD), czyli komputer pomiarowy,
- czujniki pomiarowe wraz z okablowaniem; w systemie wykorzystano 4 typy czujników: akcelerometry, termopary, czujniki prędkości obrotowej oraz tensometry.

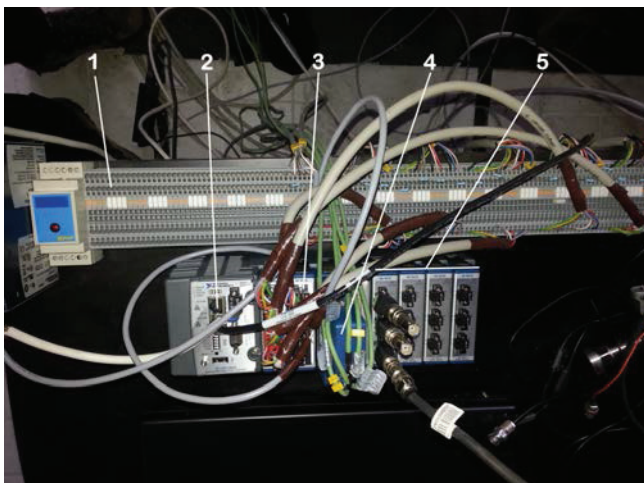
Budowę systemu akwizycji danych pomiarowych, jako systemu czasu rzeczywistego, umożliwiło wykorzystanie przemysłowego kontrolera automatyki typu NI CompactRIO. Wartości zmierzone przez czujniki pomiarowe są kondycjonowane i przetwarzane przez jednostkę akwizycji danych pomiarowych. Następnie są przesyłane i wyświetlane na monitorze stacji operatorskiej. Mierzone są następujące wielkości:

- przyspieszenia, które po przetworzeniu na ekranie operatora wyświetlane są jako wartości skuteczne prędkości drgań,
- temperatura,
- prędkości obrotowe turbiny i generatora,
- odkształcenia, które są przetwarzane i wyświetlane w postaci naprężeń.

Łącznie przewidziano 22 kanały pomiarowe. Ogólny schemat systemu wraz z orientacyjnym rozmieszczeniem punktów pomiarowych pokazano na rys. 2. Zabudowany system akwizycji danych pomiarowych pokazano na rys. 3.



Rys. 2. Schemat koncepcyjny systemu diagnostycznego (legenda: MT – mikroturbina, PP – przekładnia pasowa, G – generator prądu, JAD – jednostka akwizycji danych, SO – stacja operatorska, T – temperatura, a – przyspieszenie, n – obroty, ϵ – odkształcenia) [3]



Rys. 3. System akwizycji danych: 1 – listwa przyłączeniowa, 2 – komputer pomiarowy NI-cRIO, 3 – moduły sygnałów napięciowych, 4 – moduły pomiaru temperatury, 5 – moduły sygnałów z akcelerometrów [3]

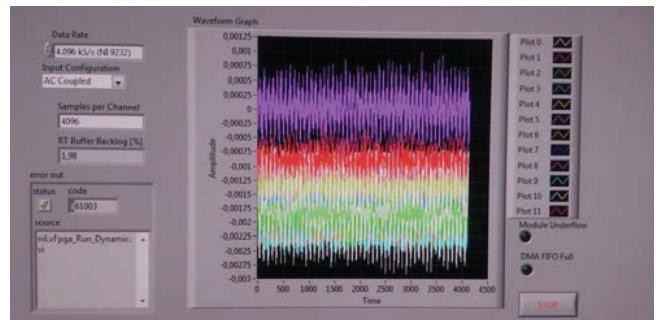
Aplikacja pomiarowo-monitorująca

Aplikacja pomiarowo-monitorująca, opracowana w graficznym środowisku pomiarowym LabVIEW firmy National Instruments, od strony programowej składa się z modułu FPGA służącego do programowania działania urządzeń na poziomie sprzętowym, nadrzędnej aplikacji w kontrolerze CompactRIO oraz aplikacji działającej na stacji operatorskiej, która komunikuje się z kontrolerem systemu CompactRIO 9025 poprzez port sieciowy. Wszystkie te części zgrupowane są w jednym projekcie środowiska LabVIEW.

Kontroler CompactRio pozwala na pomiar poszczególnych wielkości za pośrednictwem odpowiednich modułów. Do pomiaru temperatury za pomocą termopar typu K wybrano moduł NI 9214. Przy pomiarze sygnałów napięciowych $0 \div 10$ V z przetworników prędkości obrotowych i naprężeń wykorzystano moduł NI 9205. Natomiast zarówno do pomiaru, jak i zasilania czujników trójosiowych do pomiaru drgań zastosowano moduły NI 9232. Na podstawie zmierzonych wartości dla poszczególnych sygnałów obliczane jest odchylenie standardowe w oparciu o zadaną liczbę próbek (domyślnie 1000). Po zgrupowaniu wyświetlane są one jako zmienne (dla każdego modułu osobno) 9232-1, 9232-2, 9232-3, 9232-4. Zmierzone wartości przekazywane są do nadrzędnej aplikacji w kontrolerze CompactRIO.

Odpowiednie zaprogramowanie FPGA umożliwia pomiar z dużą częstotliwością próbkowania z kilku modułów równocześnie. Dzięki temu otrzymujemy pomiar w czasie rzeczywistym. Moduły włączone do FPGA działają na wspólnym zegarze.

Na rys. 4 pokazano zdjęcie aplikacji działającej w kontrolerze CompactRio, odpowiedzialnej za odczyt wartości z modułów zaprogramowanych w aplikacji FPGA, obsługującej akcelerometry, podczas testów na stanowisku laboratoryjnym.



Rys. 4. Zdjęcie aplikacji działającej wewnątrz komputera pomiarowego CompactRio odpowiedzialnej za odczyt wartości z modułów zaprogramowanych w aplikacji FPGA, obsługującej akcelerometry [3]

W aplikacji pracującej na stacji operatora zaprojektowano trzy okna dialogowe: Monitor, Konfiguracja i FFT. Główny ekran aplikacji stanowi okno Monitor (pokazane na rys. 5), na którym w czasie pracy systemu wyświetlane są (w postaci liczbowej) aktualnie mierzone wielkości.



Rys. 5. Okno Monitor podczas testu z losowo generowanymi wartościami wielkości pomiarowych

Umożliwiono także graficzną wizualizację czasowych przebiegów mierzonych wielkości oraz wyświetlanie (w dodatkowym oknie) widma częstotliwościowego wybranego, zarejestrowanego sygnału drganiowego. Przewidziano możliwość zapisu aktualnie mierzonych wielkości do pliku tekstowego. Na ekranie Monitor zamieszczono schemat turbogeneratora, na którym wyświetlane są 22 aktualnie mierzone parametry w dziewięciu miejscach odpowiadających punktom pomiarowym:

- 1: generator, wolny koniec** – pomiar wielkości: Vrms-X-1, Vrms-Y-1, T-1 na łożysku generatora od strony wolnego końca;
 - 2: generator, przekładnia** – pomiar wielkości: Vrms-X-2, Vrms-Y-2, T-2 na łożysku generatora od strony przekładni;
 - 3: łożysko, dolot** – pomiar wielkości: Vrms-X-3, Vrms-Y-3, Vrms-Z-3, T-3 na łożysku mikroturbiny od strony dolotu (strona przekładni);
 - 4: króciec, dolotowy** – pomiar wielkości: T-4, σ -4;
 - 5: korpus** – pomiar wielkości: T-5, σ -5 na korpusie mikroturbiny;
 - 6: króciec wylotowy** – pomiar wielkości T-6, σ -6;
 - 7: łożysko, wylot** – pomiar wielkości: Vrms-X-7, Vrms-Y-7, Vrms-Z-7, T-7 na łożysku mikroturbiny od strony wylotu (strona wolnego końca);
 - 8: generator** – pomiar wielkości n-8 na wale generatora;
 - 9: turbina** – pomiar wielkości n-9 na wale mikroturbiny;
- gdzie:
- Vrms-X – wartość skuteczna prędkości drgań w kierunku poziomym mm/s,
 - Vrms-Y – wartość skuteczna prędkości drgań w kierunku pionowym mm/s,
 - Vrms-Z – wartość skuteczna prędkości drgań w kierunku osiowym mm/s,
 - T – temperatura °C,
 - σ – naprężenia MPa,
 - n – prędkość obrotowa obr/min.

Ekran Konfiguracja umożliwia operatorowi modyfikację wartości ostrzegawczych i alarmowych rozumianych jako granica, po przekroczeniu której mierzone wielkości są wyświetlane odpowiednio na żółtym na lub czerwonym tle. Możliwa jest także modyfikacja dokładności wyświetlania wielkości (liczby miejsc dziesiętnych). Aktualna konfiguracja jest zapisywana w pliku tekstowym. Przewidziano możliwość powrotu do ustawień domyślnych konfiguracji.

Test aplikacji pomiarowej na stanowisku laboratoryjno-badawczym

W związku z trwającymi pracami nad uruchomieniem prototypowej mikroturbiny o mocy 100 kW, podczas prac nad systemem diagnostycznym nie istniała możliwość jego uruchomienia na docelowym obiekcie. Przeprowadzono wstępne uruchomienie oraz testy aplikacji pomiarowo-monitorującej na laboratoryjnym stanowisku badawczym VIBSTAND firmy EC Systems. Pomiary wykonano dla trzech częstotliwości falownika: 20 Hz, 45 Hz i 65 Hz, co odpowiadało prędkościom obrotowym wirnika: 400, 900 i 1300 obr/min. Podczas testu na stanowisku badawczym na obudowie przekładni zamontowano:

- jedną termoparę – na ekranie operatora odpowiadała ona punktowi pomiarowemu T-1,
- trzy akcelerometry, odpowiadające punktom Vrms-X-1, Vrms-X-2, Vrms-Y-2,
- tensometr, odpowiadający punktowi σ -4.

Pozostałe czujniki były podłączone do odpowiednich modułów kontrolera CompactRio, jednak nie były podłączone do stanowiska badawczego, co oznacza, że wielkości wyświetlane na ekranie wskazywały puste sygnały.

Podczas testu zaobserwowano, że wraz ze wzrostem prędkości obrotowych temperatura T-1, rosła od 23,1°C do 38,8°C. W punkcie σ -4 były wyświetlane mikroodkształcenia, których wartość wraz ze wzrostem prędkości obrotowej i temperatury zmieniała się od -0,00013 do -0,00020. Podczas pracy na obiekcie rzeczywistym wielkości te będą tarowane i przeliczane na naprężenia. Poziom drgań wyświetlanych w badanych trzech punktach pomiarowych był bardzo niski i pozostawał na stałym poziomie, tj. Vrms-X-1 \approx 0,0018 mm/s, Vrms-X-2 \approx 0,0020 mm/s oraz Vrms-Y-2 \approx 0,015 mm/s.

Podsumowanie

W artykule opisano opracowany w IMP PAN w Gdańsku nowy system wibrodiagnostyczny, przeznaczony do bieżącej kontroli stanu dynamicznego prototypowej mikroturbiny parowej o mocy elektrycznej na poziomie 100 kW. System pełni funkcję pomiarowo-monitorującą oraz pozwala na wczesne wykrywanie potencjalnych defektów. Ze względu na problemy dynamiczne, które – jak wykazały obliczenia sprawdzające [4, 5] – mogą pojawiać się podczas pracy mikroturbiny, wymaga ona szczególnego nadzoru. Niekontrolowany wzrost poziomu drgań może doprowadzić do przedwczesnego zużycia łożysk lub otarcia wirnika o korpus, a nawet poważanej awarii. W artykule opisano pierwsze testy systemu wraz z aplikacją pomiarowo-monitorującą, przeprowadzone na stanowisku badawczym dynamiki wirników, symulującym pracę mikroturbiny. Ostateczna implementacja systemu na docelowej mikroturbinie o mocy 100 kW będzie możliwa po zakończeniu przygotowań układu ORC do pracy w trybie wytwarzania energii elektrycznej. Opracowany system diagnostyczny jest na tyle uniwersalny, że można go będzie również wykorzystać do monitorowania stanu technicznego innych maszyn przepływowych.

LITERATURA

1. Kiciński J., Żywica G., Banaszek S., Bogulicz M., Bagiński P., Andrearczyk A. „Opracowanie i budowa systemu wibrodiagnostycznego dla mikroturbin parowych pracujących w układach ORC – Etap I: Opracowanie koncepcji i schematu systemu, dobór elementów aparatury badawczej i pomiarowej, opracowanie wstępnego interfejsu użytkownika”. Oprac. wew. IMP PAN, nr arch. 899/2014, Gdańsk 2014.
2. Kiciński J., Żywica G., Banaszek S., Bogulicz M., Bagiński P., Andrearczyk A. „Opracowanie i budowa systemu wibrodiagnostycznego dla mikroturbin parowych pracujących w układach ORC – Etap II: Komplektacja i integracja elementów aparatury badawczo-pomiarowej, opracowanie interfejsu użytkownika i aplikacji kontrolno-pomiarowej, wstępne testy funkcjonowania systemu”. Oprac. wew. IMP PAN, nr arch. 7/2015, Gdańsk 2015.
3. Żywica G., Bogulicz M., Andrearczyk A., Bagiński P., Banaszek S. „Opracowanie i budowa systemu wibrodiagnostycznego dla mikroturbin parowych pracujących w układach ORC – Etap III: Instalacja elementów aparatury pomiarowej, optymalizacja interfejsu użytkownika i aplikacji kontrolno-pomiarowej, uruchomienie i testy systemu na rzeczywistym obiekcie”. Oprac. wew. IMP PAN, nr arch. 901/2015, Gdańsk 2015.
4. Kiciński J., Żywica G. „Analiza właściwości dynamicznych wirnika siedmiostopniowej osiowej mikroturbiny parowej układu ORC, z uwzględnieniem właściwości układu podpierającego. Ocena niebezpieczeństwa wystąpienia zjawiska rezonansu przy prędkości nominalnej oraz podczas rozbiegu”. Oprac. wew. IMP PAN, nr arch. 494/2014, Gdańsk 2014.
5. Breńkacz Ł., Żywica G. „Analiza właściwości dynamicznych układu mikroturbogeneratora o mocy 100 kW ze uwzględnieniem przekładni pasowej i generatora energii elektrycznej. Ocena niebezpieczeństwa wystąpienia zjawiska rezonansu w układzie przy prędkościach roboczych”. Oprac. wew. IMP PAN, nr arch. 1058/2014, Gdańsk 2014.
6. Barszcz T. „Systemy monitorowania i diagnostyki maszyn”, Kraków: Wyd. ITE – PIB, 2006.
7. Barszcz T., Urbanek J. „Monitorowanie i diagnostyka maszyn wirnikowych”, Kraków: Wyd. ITE – PIB, 2008.
8. Żywica G., Kiciński J. „The influence of selected design and operating parameters on the dynamics of the steam micro-turbine”. *Open Engineering* (2015) 5, pp. 385-398.
9. Żywica G., Bagiński P., Breńkacz Ł. „Dynamic state assessment of the water turbine with the power of 600 kW”. *Diagnostyka* (2013) 14(1), s. 65-70. ■