

Sławomir Wróblewski⁽¹⁾, Andrzej Bytnar⁽²⁾, Piotr Pietrzak⁽¹⁾

(1) Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej

(2) Instytut Energetyki w Warszawie

WIELOKANAŁOWY SYSTEM POMIAROWO-ANALITYCZNY ON-LINE DO DIAGNOSTYKI WIBRACYJNEJ TURBOGENERATORA

MULTI-CHANNEL ANALYTICAL MEASUREMENT SYSTEM FOR ONLINE TURBOGENERATOR VIBRATION DIAGNOSTICS

Abstract: The paper presents a multi-channel analytical measurement system for online vibration diagnostics of turbogenerator technical condition. Several types of acceleration sensors with different parameters (supply voltage, frequency band, sensitivity etc.) were used in vibration measurements. Possible variations of the number of sensors, their locations and parameters are taken into account in the system architecture. The measurements are parametrized with thermal, electrical and physical quantities (real and reactive power, stator winding voltage, temperature of relevant structural components and cooling medium) of the turbogenerator. The system contains modules, which perform basic analysis of measurement data. The data acquired by the modules make it possible to determine spatial distribution of vibration acceleration and velocity of stator parts in the function of relevant electrical parameters. Other more advanced modules are used to build vibration criterion maps (resulting from a technical condition) in turbogenerator admissible load graph. The envelope of the field of extreme values in the resultant vibration map determines in many cases an overriding constrain for the load. The system stores its configuration for vibration measurement and analysis results in a properly designed database. The system architecture enables its quick adaptation to measurements and analyses in other technical objects with different measurement sensors.

1. Wstęp

W przemyśle energetycznym diagnostyka wibracyjna zyskuje coraz większą popularność, lecz wciąż jest brak odpowiednich systemów wyposażonych w satysfakcjonujące metody analizy sygnałów wibracji i gromadzenia danych pomiarowych.

W diagnostyce wibracyjnej stosowane są zazwyczaj proste mierniki elektroniczne, wyposażone zwykle w jeden czujnik wibracji lub bardziej zaawansowane urządzenia (z analizatorem widma) współpracujące zazwyczaj z kilkoma takimi czujnikami.

W diagnostyce nieskomplikowanych mechanizmów (łożyska, przekładnie) użycie prostych urządzeń pomiarowych jest w zupełności wystarczające. Diagnostyka turbogeneratora stawia natomiast o wiele większe wymagania systemom pomiarowym.

2. Diagnostyka wibracyjna

Metoda wibracyjna jest jedną z najefektywniejszych metod oceny stanu technicznego stojanów generatorów [1, 2, 3]. Wielokrotnie wykrywano poważne uszkodzenia skrajnych zębów rdzenia oraz koszyków połączeń czołowych uzwojenia stojana. W niektórych typach turbogeneratorów

stwierdzano pęknięcia belek zawieszenia rdzenia, zerwania połączeń śrubowych ich elementów równoległych i pęknięcia spoin łączących belki z grodziami korpusu.

W diagnostyce wibracyjnej zachodzi konieczność przeprowadzania badań obiektów za pomocą analizy sygnałów uzyskanych z czujników różnych typów z różnych punktów pomiarowych. Niekiedy znaczenie ma także kierunek pomiaru oraz liczba sygnałów wejściowych.

Diagnostyka maszyn o wielkich gabarytach, jak np. turbogeneratory wymaga nawet kilkudziesięciu punktów pomiarowych [4].

Na przestrzeni wielu lat badań stwierdzono, że wraz z pomiarem sygnałów wibracji powinny być mierzone inne wielkości fizyczne, charakteryzujące punkt pracy urządzenia, np. moc czynna, bierna, napięcie, które to wielkości pozyskiwane są z przetworników elektronicznych parametrów sieci.

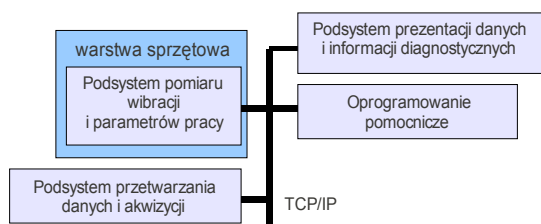
Badania wibracyjne wielkich obiektów, jakimi są stojany turbogeneratorów, wymagają zastosowania systemu pomiarowego o dużej liczbie kanałów pomiarowych, możliwości parametryzacji pomiarów oraz elastycznej rekonfiguracji umożliwiającej dostosowanie go do przeprowadzania badań na wielu obiektach. Współcześnie w elektrowniach stosowana jest

diagnostyka wibracyjna łożysk i wałów generatorów. Mierzone są poziomy wibracji łożysk i przemieszczenia wału zgodnie z obowiązującą normą oraz przedstawiane są widma sygnałów drganiowych w zakresie niskich częstotliwości. Nie są znane autorom podobne systemy stosowane w diagnostyce drganiowej (stanu technicznego) stojana generatora (jednocześnie korpusu, rdzenia i połączeń czołowych uzwojenia). Kanadyjska firma VIBROSYSTEM oferuje dla hydrogeneratorów zbliżony (w pewnym sensie) system monitoringu, w którym jednak nie zastosowano zaawansowanej analizy diagnostycznej.

3. Budowa systemu

System diagnostyczny zbudowany został od podstaw. Podczas projektowania uwzględniono wymagania diagnostyki wibracyjnej dla wielkich maszyn. Dzięki opracowaniu odpowiedniej architektury oraz wykorzystaniu efektywnych narzędzi programistycznych uzyskano pożądaną funkcjonalność.

System posiada budowę rozproszoną z komunikacją opartą o protokół TCP/IP (rys. 1).



Rys. 1. Schemat blokowy systemu

Rdzeń systemu składa się z czterech podsystemów wymieniających informacje w sieci komputerowej. Podsystem *pomiaru wibracji i para-metrów pracy* jest warstwą sprzętową systemu, pozostałe podsystemy są to samodzielne aplikacje komputerowe.

Oprogramowanie zbudowano przy pomocy środowiska programistycznego Net Beans w wersji 6.9.1, języka Java (jdk 6.x), biblioteki Swing interfejsu użytkownika, mapowania obiektowo-relacyjnego za pomocą Hibernate 3.3.2 oraz serwera bazy danych PostgreSQL w wersji 8.4.

4. Warstwa sprzętowa systemu diagnostyki maszyn

Na potrzeby prezentowanego w niniejszym artykule systemu diagnostyki wibracyjnej opracowana została warstwa sprzętowa –

rozproszony *podsystem pomiaru wibracji i para-metrów pracy* [6]. Jego zadaniem jest dostarczenie kompleksowej informacji wymaganej przez procedury diagnostyczne zaimplementowane w warstwie programowej *podsystemu przetwarzania danych i akwizycji*. Struktura warstwy sprzętowej systemu została przedstawiona na rysunku 2. Ze względu na właściwości badanego obiektu, obwody pomiarowe systemu zostały podzielone na dwie części. Pierwsza z nich obejmuje podsystem pomiaru wibracji oraz wyspecjalizowane przetworniki umożliwiające pomiar temperatury w wybranych punktach turbogeneratora. Drugą część stanowi podsystem pomiaru parametrów pracy turbogeneratora, takich jak napięcie uzwojenia stojana, moc czynna oraz moc bierna.

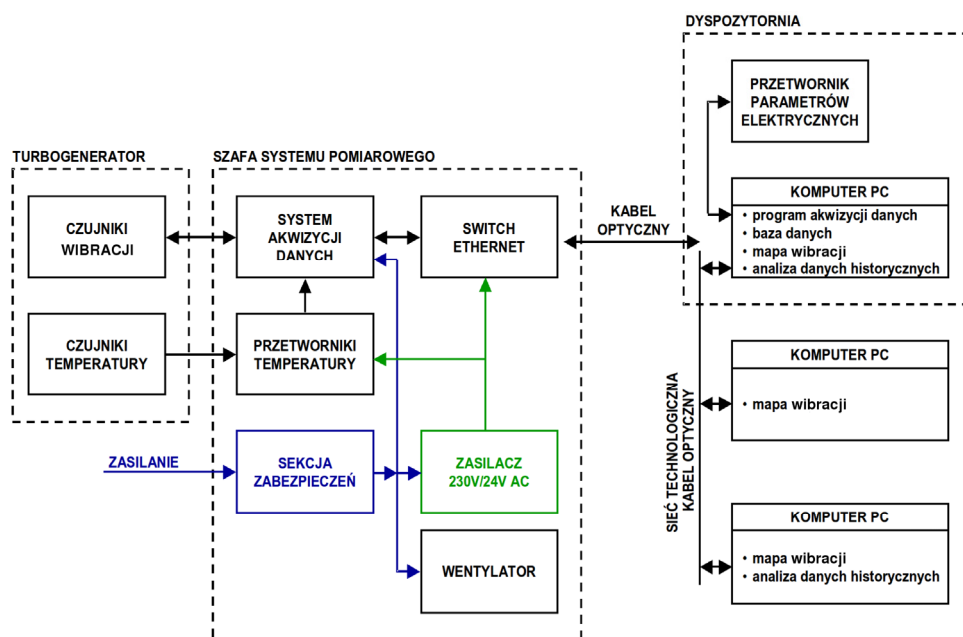
4.1. Czujniki i przetworniki pomiarowe

W obecnej postaci systemu, do pomiaru wibracji wykorzystano dwa typy czujników przyspieszenia. Do pomiaru wibracji rdzenia stojana, użyto powszechnie stosowane w tego typu aplikacjach akcelerometry piezoelektryczne z wbudowanym wzmacniaczem ładunku, zasilane ze źródła stałoprądowego o wydajności 4 mA. Zastosowano zarówno czujniki jednoosiowe, jak i wieloosiowe, mierzące przyspieszenie wibracji w kierunkach: promieniowym, stycznym i osiowym.

Inny typ czujników wykorzystany został do pomiaru wibracji połączeń czołowych uzwojenia stojana. Ze względu na występowanie w tej części turbogeneratora bardzo dużych różnic potencjałów, konieczne okazało się zastosowanie akcelerometrów optycznych.

Wibracje korpusu, w podstawowej wersji systemu pomiarowego, mierzone są przez akcelerometry piezoelektryczne, instalowane na zewnętrznej powierzchni stojana turbogeneratora. Zastosowano tutaj czujniki jednoosiowe oraz trójosiowe.

Innym rozwiązaniem w zakresie pomiaru wibracji korpusu może być włączenie w strukturę systemu 30 bezprzewodowych wielo-kanalowych modułów pomiarowych. Każdy z nich mierzy wibracje w 3 wzajemnie prosto-padłych kierunkach. Moduły bezprzewodowe wykorzystują półprzewodnikowe czujniki przyspieszenia, wykonane w technologii mikro-maszynowej (MEMS).



Rys.2. Struktura warstwy sprzętowej systemu diagnostyki turbogeneratorów

W swojej strukturze oprócz mikrokontrolera posiadają reprogramowalny układ scalony (FPGA) przetwarzający dane pomiarowe w czasie rzeczywistym. Komunikacja z systemem nadrzędnym odbywa się przy użyciu interfejsu IEEE802.11 (WiFi).

Istotnym parametrem diagnostyki turbogenerators jest temperatura jego części aktywnych i medium chłodzącego. W omawianym systemie liczba czujników temperatury została ograniczona do dwóch. W obecnej postaci system pomiarowy wykorzystuje przetworniki (komercyjnie dostępne) przetwarzające sygnał z rezystancyjnych czujników temperatury (Pt100) na standaryzowany sygnał napięciowy 0÷10 V. Dokonują one pomiaru temperatury destylatu na wypływie z uzwojenia oraz najgorętszej części rdzenia stojana. Rozważa się możliwość zainstalowania we wnętrzu turbogenerators do kilkudziesięciu półprzewodnikowych scalonych czujników temperatury, wykorzystujących wspólną magistralę.

Odrębny element systemu stanowi podsystem pomiaru parametrów elektrycznych charakteryzujących bieżący stan pracy turbogenerators. Pomiar wielkości takich, jak napięcia uzwojeń stojana, moc czynna oraz moc bierna, wymagają podłączenia urządzenia pomiarowego do przekładników prądowych i napięciowych zainstalowanych w obwodach wyjściowych turbogenerators. Na potrzeby systemu diagnostyki wibracyjnej zostało opracowane i zrealizowane dedykowane

urządzenie do pomiaru parametrów elektrycznych, posiadające odpowiednią funkcjonalność, wysoką dokładność przetwarzania oraz interfejsy komunikacyjne zapewniające łatwą integrację w systemie. Niestety w chwili obecnej nie posiada ono stosownych certyfikatów zezwalających na włączenie go w obwody pomiarowe turbogenerators. Z tego powodu w prezentowanym rozwiązaniu wykorzystano pracujący w elektrowni przetwornik pomiarowy, udostępniający wymaganą informację pomiarową poprzez interfejs MODBUS/RTU. Przetwornik został włączony w strukturę systemu diagnostycznego łączem Ethernet 100Base-TX za pośrednictwem konwertera interfejsu MODBUS/RTU na MODBUS/TCP.

4.2. System akwizycji danych

Sygnał pochodzący z czujników przyspieszenia oraz temperatury rejestrowany jest w systemie akwizycji danych. Jego podstawowy element stanowią specjalnie zaprojektowane karty przetwornikowe. Każda z kart umożliwia podłączenie 16 akcelerometrów. Sygnał doprowadzony do każdego z jej wejść poddawany jest wzmocnieniu oraz filtracji wstępnej, a następnie przetwarzany na postać cyfrową. Za przetwarzanie analogowo-cyfrowe odpowiedzialnych jest 16 dwudziestoczerobitowych przetworników typu Δ - Σ . Wszystkie przetworniki pracują w sposób

synchroniczny, umożliwiając jednocześnie próbkowanie sygnału w każdym z torów pomiarowych. Maksymalna częstotliwość próbkowania wynosi 128 kHz. Efektywna rozdzielczość przetwarzania osiąga 19,5 bita i nie zależy od częstotliwości próbkowania sygnału.

Karty przetwornikowe posiadają zaimplementowane zaawansowane mechanizmy automatycznej kalibracji poziomu zera oraz wzmocnienia sygnału. Przeprowadzenie kalibracji toru pomiarowego w określonych warunkach pomiaru (głównie przy zmianie temperatury) pozwala zminimalizować błędy pomiarowe. W efekcie możliwe jest uzyskanie rozdzielczości pomiaru napięciowego sygnału wejściowego na poziomie 6 μV . Błąd względny pomiaru nie przekracza wartości 0,05 %.

Z każdym wejściem powiązane jest źródło stałoprądowe o wydajności 4 mA, zasilane napięciem 20 V. Źródła te zasilają akcelerometry piezoelektryczne. Poprzez interfejs użytkownika, źródło może zostać odłączone, dzięki czemu karta przetwornikowa może współpracować z dowolnym typem czujników posiadającym wyjście napięciowe (m.in. optyczne czujniki przyspieszenia).

Ze względu na dużą liczbę czujników, w opisywanym urządzeniu zaistniała konieczność zastosowania trzech szesnastokanałowych kart przetwornikowych. Uwzględniając łatwość integracji całości systemu, zdecydowano się na zastosowanie w kartach przetwornikowych interfejsu komunikacyjnego Ethernet 100base-TX. Każda z kart przetwornikowych posiada nadany jej przez użytkownika adres IP, dzięki któremu rozpoznawana jest w systemie.

Dodatkową funkcjonalnością kart jest możliwość wzajemnej synchronizacji procesu próbkowania mierzonego sygnału. W tym celu, każda z nich została wyposażona w dedykowane złącze synchronizacji.

Każda z kart posiada ponadto 4 analogowe wejścia przystosowane do pomiaru napięć z zakresu 0-10 V. Przeznaczone są one do pomiaru wartości parametrów procesowych, mierzonych przez zewnętrzne układy pomiarowe. W bieżącym rozwiązaniu, zostały one wykorzystane do pomiaru temperatury.

5. Oprogramowanie

Głównymi elementami oprogramowania systemu jest aplikacja *przetwarzania danych*

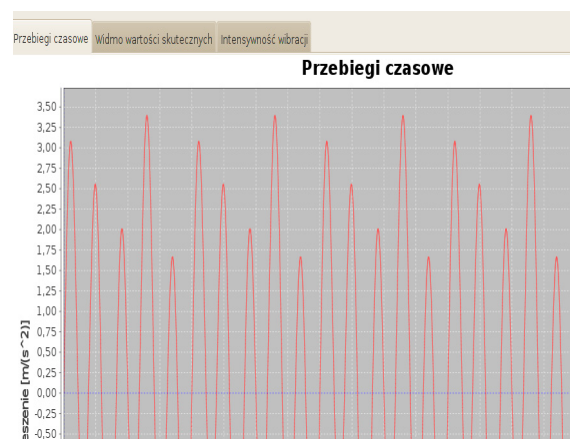
i akwizycji oraz prezentacji danych i informacji diagnostycznych. Pierwsza z nich steruje urządzeniami elektronicznymi, odbiera i dokonuje preprocesingu sygnałów wibracji, temperatury i parametrów pracy oraz zapisuje je w bazie danych. Druga, na podstawie odpowiedniej analizy danych, wypracowuje i wizualizuje informację diagnostyczną za pomocą odpowiednich prezentacji.

Na potrzeby sterowania *podsystem pomiaru wibracji i parametrów pracy* opracowano własny protokół komunikacyjny nad protokołem TCP/IP zapewniającym poprawność otrzymanych danych. Dane sterujące pobierane są z bazy danych i przesyłane w postaci konfiguracji urządzeń pomiarowych.

W skład systemu wchodzi także *oprogramowanie pomocnicze* pozwalające na budowę konfiguracji systemu i zapisanie jej w bazie danych oraz na generowanie raportów i instrukcji instalowania elementów systemu (rozmoszczenie czujników, podłączenie ich do odpowiednich kart) itd.

6. Prezentacja analiz

Wstępna prezentacja analiz dokonywana jest już w *podsystemie przetwarzania danych i akwizycji*. Wizualizowane są sygnały z wybranych punktów pomiarowych zarówno kierunkowe (promieniowe, styczne, osiowe), jak i przestrzenne (sumowanie geometryczne) w konkretnych stanach obciążenia turbogeneratora (moc czynna i bierna, napięcie i prąd uzwojenia stojana, temperatury części czynnych i czynników chłodzących). Prezentowane są także: widma prędkości i przyspieszenia wibracji w funkcji czasu (rys. 3), oraz ich sumaryczne wartości RMS.



Rys.3. Przebieg sygnału przyspieszenia

7. Wskaźniki wibracji

7.1 Wprowadzenie

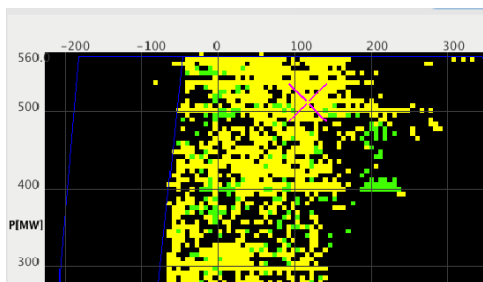
Wskaźniki poziomów wibracji świadczące o stanie technicznym urządzenia, wizualizowane są przez *podsystem prezentacji danych i informacji diagnostycznych*. W systemie zaimplementowano dwa podstawowe wskaźniki poziomów wibracji pomocne w określeniu stanu technicznego całego stojana oraz jego elementów:

- mapa wibracji,
- poziomy wibracji.

System posiada także narzędzia analizy szczegółowej wibracji – moduł prezentacji wartości wibracji i odkształceń.

7.2. Mapa wibracji

Podczas pracy turbogeneratorsa nanoszone są w trybie on-line największe wartości prędkości wibracji stojana na wykres jego granicznego obciążenia. Powstają parametryczne wielokolorowe mapy wibracji całego i wydzielonych części stojana adekwatne do ich stanu technicznego, zgodnie z przyjętymi wartościami kryterialnymi (rys. 4). Poziomy wibracji przedstawiane są w postaci barwnych punktów określających stan techniczny maszyny.



Rys. 4. Mapa wibracji

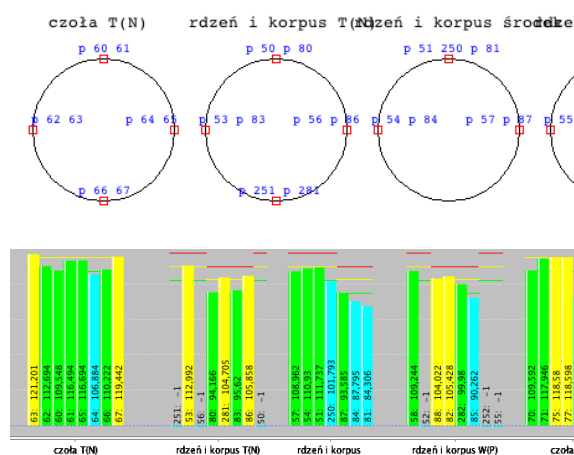
Mapy wyznaczają obszary pracy maszyny o niebezpiecznej wibroaktywności związanej z istotnym obniżeniem się sztywności materiałów czynnych i nadmiernymi luzami w węzłach konstrukcyjnych. Długotrwała praca w tych obszarach może doprowadzić do poważnych uszkodzeń maszyny. Uzyskane informacje sugerują – podczas bieżącej eksploatacji – konieczność przesunięcia punktu pracy turbogeneratorsa poza obszar wzmożonych wibracji oraz zaplanowanie remontu obiektu.

Wartości kryterialne wibracji zostały wyznaczone przez Instytut Energetyki na podstawie badań

wibracyjnych i analiz stanu technicznego wielu dużych turbogeneratorsów [5].

7.3. Poziomy wibracji

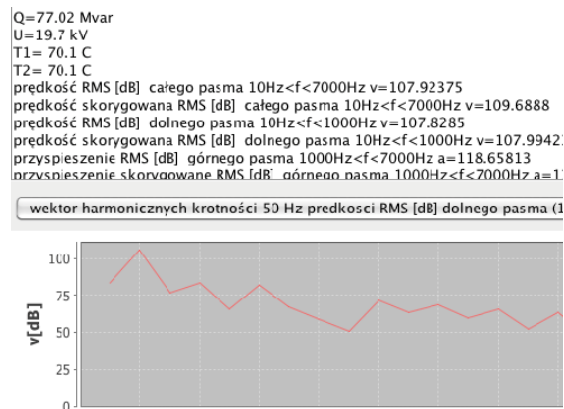
Szczegółowa informacja o wartościach wibracji całego stojana (wraz z rozmieszczeniem punktów pomiarowych w przekrojach poprzecznych maszyny) przedstawiana jest w postaci barwnych wykresów z naniesionymi poziomami kryterialnymi (rys. 5). Z wykresu można odczytać wartości wibracji w każdym punkcie pomiarowym przy danym obciążeniu turbogeneratorsa oraz określić, w jakim stanie technicznym znajduje się dany podzespół maszyny.



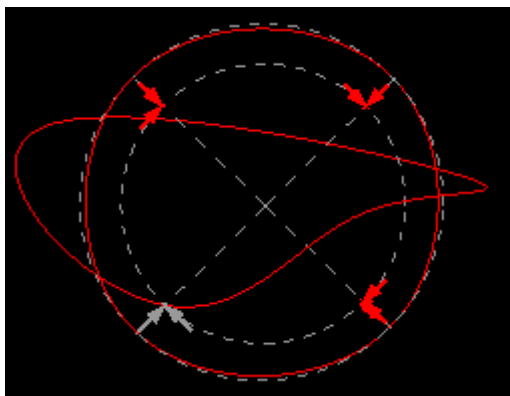
Rys. 5. Poziomy wibracji

7.4. Narzędzia analizy szczegółowej

System posiada moduły analizy szczegółowej przeznaczone dla eksperta. Moduł prezentacji wartości wibracji (lub innych zgromadzonych danych, jak np. temperatura) w funkcji zmiany wybranego parametru (czasu, mocy, napięcia itd.) (rys. 6.) oraz moduł wizualizacji odkształceń rdzenia i korpusu stojana (rys. 7).



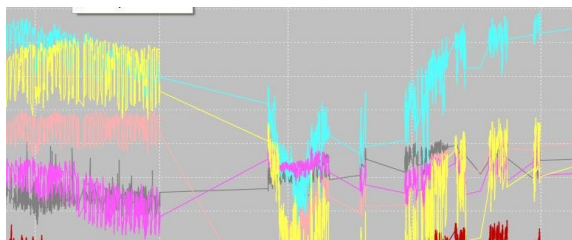
Rys. 6. Okno analizy wskaźników wibracji



Rys. 7. Wizualizacja odkształceń

8. Praktyczne wykorzystanie systemu

Jednym z przykładów wykorzystania systemu jest weryfikacja, jakości dosztywnienia mocowań kosza połączeń czołowych uzwojenia stojana. W czasie pracy systemu dokonano dosztywnienia mocowań kosza połączeń czołowych uzwojenia stojana. Za pomocą analizy danych historycznych stwierdzono poprawienie, jakości połączeń po dosztywnieniu – wartości wibracji uległy zmniejszeniu, jednakże po około dwóch miesiącach pracy drgania ponownie zaczęły wzrastać (błękitny i żółty przebieg poziomu wibracji na rys. 8).



Rys. 8. Zmiany poziomu wibracji kosza połączeń czołowych

8. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wielokanałowy system pomiarowo-analityczny on-line do diagnostyki wibracyjnej stanu technicznego stojana turbogeneratorskiego. W pomiarach wibracji wykorzystuje się kilka typów czujników przyspieszenia o różnych wartościach parametrów znamionowych. Pomiar parametrów jest wykonywany elektrycznymi i cieplnymi wielkościami fizycznymi turbogeneratorskiego (moc czynna i bierna, napięcie uzwojenia stojana, temperatura istotnych elementów konstrukcyjnych i mediów chłodzących). System posiada moduły podstawowej analizy

wyników pomiarów, które umożliwiają wyznaczanie rozkładów przestrzennych przyspieszenia i prędkości wibracji elementów stojana w funkcji istotnych parametrów elektrycznych. Bardziej zaawansowane moduły stosowane są dla tworzenia kryterialnych map wibracji elementów i całego stojana na wykresie dopuszczalnych obciążeń turbogeneratorskiego. System składa się z przyjętej konfiguracji pomiarów wibracyjnych oraz wyników analiz w odpowiednio przygotowanej bazie danych.

9. Literatura

- [1] Bytnar A.: *Turbogenerator stator failures due to some physical phenomena*. Poznan University of Technology Academic Journal, Electrical Engineering, No 2, pp. 35-46, 2007.
- [2] Bytnar A.: *Obciążalność dużego turbogeneratorskiego w aspekcie niektórych zjawisk fizycznych występujących w jego stojanie*, Prace Naukowe, Elektryka z. 94, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1990.
- [3] Morel J.: *Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego*, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, 1992.
- [4] Napieralski A., Bytnar A., Kulesza Z., Tylman W., Pietrzak P., Piotrowicz M., Wróblewski S., Podsiadły P., Makowski M., Pękosiński B.: *Systemy monitoringu i predykcji awarii dużych maszyn wirnikowych*. Raport z projektu badawczego MNiSW, nr 8 T11 B 021 19.
- [5] Wróblewski S.: *Diagnostyka wibracyjna stanu technicznego maszyny synchronicznej*. Rozprawa doktorska, Łódź 2008.
- [6] Pietrzak P., Makowski M., Bytnar A., *Bezprzewodowy rozproszony system pomiarowy do modalnych badań struktur mechanicznych*, Archiwum Konferencji PTETIS vol. 27, Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Elektromechaniki i Mechatroniki PPEEm 2009, Wisła, 2009, ISBN 83-922242-6-4.

Autorzy

dr inż. Sławomir Wróblewski, Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Łódzkiej, ul. Wólczańska 221/223, 90-924 Łódź, E-mail: swroble@dmc.p.lodz.pl;

dr hab. inż. Andrzej Bytnar prof. n.z.; Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, E-mail: andrzej.bytnar@ien.com.pl;

dr inż. Piotr Pietrzak, Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Łódzkiej, ul. Wólczańska 221/223, 90-924 Łódź, E-mail: pietrzak@dmc.p.lodz.pl;

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Czesław T. Kowalski