

Andrzej Bytnar
Instytut Energetyki, Warszawa
Sławomir Wróblewski
Ericsson Sp z o.o., Polska

METODA AUTOMATYCZNEJ OCENY STANU WIBRACYJNEGO I TECHNICZNEGO STOJANA TURBOGENERATORA

AUTOMATIC EVALUATION METHODS OF A VIBRATING AND TECHNICAL CONDITION OF TURBOGENERATOR'S STATOR

Streszczenie: Przedstawiono metodę automatycznej oceny stanu wibracyjnego i technicznego stojana turbogeneratora. W metodzie wykorzystano kryteria wibracyjne wraz z ich wartościami granicznymi wyznaczonymi na podstawie własnych badań pomiarowo-analitycznych i wizualizacyjnych turbogeneratorów o mocach 50 MW ÷ 560 MW. Dla istotnych części stojana i ich elementów programy komputerowe podają na wykresie dopuszczalnych obciążeń turbogeneratora ocenę stanu wibracyjnego (dla bieżącego nadzoru) zaś w zestawieniu tabelarycznym w postaci raportu – ocenę stanu technicznego w zadanym okresie pracy turbogeneratora (dla planowania remontów). Opracowana metoda rozszerza możliwości diagnostyczne systemu monitoringu wibracji turbogeneratora opracowanego w Instytucie Energetyki i wdrożonego w energetyce polskiej.

Abstract: This paper describes a method for an automatic evaluation of a vibrating and technical condition of turbogenerator's stator. Vibration criteria and their threshold values have been used in the method. The criteria have been created on the basis of measurement, analytical and visualization research in 50 MW ÷ 560 MW turbogenerators. Software applications show an evaluation of the vibration condition of crucial turbogenerator stator elements on the permissible load plot (for on-line monitoring) and an evaluation of the technical condition in a given time span in a tabular form (for a scheduled preventive maintenance). The presented method extends capabilities of the vibration monitoring system that has been implemented in Polish power engineering and developed by the Institute of Power Engineering.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, turbogenerator, wibracje, stator, diagnostyka*
Keywords: *electrical machines, turbogenerator, vibrations, stator, diagnostics*

1. Wstęp

W latach 2012 - 2016 w Zespole Ekspertów Instytutu Energetyki opracowano metody oceny stanu technicznego określonych części stojana turbogeneratora w oparciu o pomiarowo-analityczne badania wibracyjne i wizualizacyjne. Metody te zostały wdrożone w energetyce krajowej i są wykorzystywane w stacjonarnym systemie diagnostycznym (zainstalowanym na blokach o mocy 560 MW) oraz przenośnym (przy badaniach różnych maszyn synchronicznych) [6]. Poprawnie wykonana ocena stanu technicznego elementów stojana wymagała jednak posiadania niezbędnych umiejętności w zakresie prowadzenia ukierunkowanych analiz wyników pomiarów parametrów fizycznych, ich interpretacji oraz określonego czasu na jej przeprowadzenie. Te niedogodności eliminuje automatyczna kompleksowa metoda oceny stanu wibracyjnego i technicznego stojana tur-

bogeneratora która została przedstawiona w niniejszym artykule.

W metodzie wykorzystano prędkości wibracji w dolnym przedziale częstotliwości $10 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ kHz}$ (i) elementów stojana oraz przyspieszenia wibracji w górnym przedziale częstotliwości $1 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ kHz}$, przy wszystkich obciążeniach czynnych i biernych (P; Q) turbogeneratora. Wartości tych parametrów wibracji odzwierciedlają zmiany wartości parametrów mechanicznych stojana związanych z degradacją elementów. Metoda umożliwia wykrywanie rozwijających się uszkodzeń w (i) elementach stojana turbogeneratora, co pozwala wyznaczać optymalne warunki jego pracy (dla spowalniania procesów degradacyjnych) oraz planowanie zakresu i terminów remontów.

2. Metoda oceny stanu wibracyjnego i technicznego stojana turbogeneratora

2.1. Przyjęte założenia

W ocenie stanu wibracyjnego (i) elementu wydzielonej (j) części stojana (na jego obwodzie oraz długości) wzięto pod uwagę dla:

połączenia czołowe uzwojenia (w obszarze wsporników i główek prętów), jarzmo i zęby rdzenia oraz korpus;

- średniokwadratową wartość prędkości wibracji $v_{(i,j)}$, w niskim paśmie częstotliwości, przy bieżącym (każdym) obciążeniu P; Q turbogeneratora,

zęby rdzenia, w przypadku trudności bezpośredniego pomiaru ich wibracji;

- średniokwadratową wartość przyspieszenia wibracji $a_{(i,j)}$ korpusu, w wysokim paśmie częstotliwości, podobnie położonego do zębów rdzenia przy bieżącym (każdym) obciążeniu P; Q turbogeneratora,

zawieszenie rdzenia;

- średniokwadratową wartość prędkości wibracji $v_{(i,j)}$ jarzma rdzenia odniesioną do analogicznej wartości prędkości wibracji korpusu $v_{(i,k)}$, w niskim paśmie częstotliwości, przy bieżącym (każdym) obciążeniu P; Q turbogeneratora.

W ocenie stanu technicznego (i) elementu w (j) części stojana wzięto pod uwagę dla:

połączenia czołowe uzwojenia (wsporniki oraz główki prętów) oraz jarzmo i zęby rdzenia;

- średnią średniokwadratową wartość prędkości wibracji $v_{(i,j)[sr]}$, w niskim paśmie częstotliwości, w całym obszarze stosowanych obciążeń P; Q turbogeneratora,
- charakter zmian średniokwadratowych wartości prędkości wibracji w funkcji mocy czynnej; $v_{(i,j)} = f(P)$ lub w funkcji prądu uzwojenia stojana; $v_{(i,j)} = f(I)$; w całym obszarze stosowanych obciążeń P; Q turbogeneratora,

zęby rdzenia w przypadku trudności bezpośredniego pomiaru ich wibracji

- średnią średniokwadratową wartość przyspieszenia wibracji $a_{(i,j)[sr]}$ korpusu, w wysokim paśmie częstotliwości, podobnie położonego do zębów rdzenia, w całym obszarze stosowanych obciążeń P; Q turbogeneratora;
- charakter zmian średniokwadratowych wartości przyspieszenia wibracji korpusu funkcji mocy czynnej; $a_{(i,j)} = f(P)$ lub funkcji

prądu uzwojenia stojana; $a_{(i,j)} = f(I)$, w całym obszarze stosowanych obciążeń P; Q turbogeneratora,

zawieszenie rdzenia w korpusie stojana;

- średnią średniokwadratową wartość prędkości wibracji jarzma rdzenia $v_{(i,j)[sr]}$ odniesioną do analogicznej wartości prędkości wibracji korpusu $v_{(i,k)[sr]}$ (podobnie położonego w przekroju poprzecznym stojana), w niskim paśmie częstotliwości, w całym obszarze stosowanych obciążeń P; Q turbogeneratora,
- średnią średniokwadratową prędkość wibracji, bez składowej harmonicznnej 100 Hz korpusu $v_{(i,k)[sr]-100Hz[sr]}$ odniesioną do analogicznej wartości prędkości wibracji jarzma rdzenia $v_{(i,j)[sr]-100Hz[sr]}$ (podobnie położonych elementów w przekroju poprzecznym stojana), w niskim paśmie częstotliwości, w całym obszarze stosowanych obciążeń P; Q turbogeneratora

Obniżanie się wartości średniokwadratowej prędkości, w niskim paśmie częstotliwości, elementu jarzma (zębów) rdzenia lub przyspieszenia elementu korpusu, w wysokim paśmie częstotliwości – przy wzroście obciążenia czynnego turbogeneratora – świadczy w pierwszym przypadku o obniżonym ciśnieniu prasowania tych elementów, a w drugim przypadku elementów zębów podobnie położonych z elementami korpusu. Przy zmniejszonym ciśnieniu prasowania, rozpatrywanych elementów rdzenia, największe wartości prędkości (przyspieszenia) wibracji występują przy małej mocy czynnej, zaś najmniejsze – przy dużej (zwykle maksymalnej) mocy czynnej turbogeneratora. Wynika to ze sztywności jarzma oraz zębów rdzenia, która zależna jest od położenia osi podłużnej wirnika względem osi faz uzwojenia stojana, czyli od kąta obciążenia maszyny, przy istniejącym stanie sprasowania rdzenia. Przy dobrze sprasowanym elemencie jarzma (zęba) rdzenia ich wartości prędkości (przyspieszenia) wibracji są podobne przy różnych wartościach obciążenia czynnego P turbogeneratora. W większości przypadków duży moment synchroniczny (adekwatny do mocy P), przenoszony z wirnika na stojan, powoduje zwiększenie sztywności rdzenia, co w konsekwencji zmniejsza wartości jego wibracji [1÷3, 5].

Dużą rolę w zmianach sztywności zębów rdzenia odgrywiają naprężenia dylatacyjne występujące w żłobkowym węźle konstrukcyjnym, któ-

re zależą od sił klinowania uzwojenia w żłobkach oraz sił mocowania jego połączeń czołowych. Wzrost wartości przyspieszenia wibracji, w wysokim paśmie częstotliwości, elementów korpusu przenoszonych z podobnie położonych elementów zębów – ze wzrostem prądu uzwojenia stojana – jest związany głównie z osłabieniem mocowania prętów uzwojenia w najbliższych położonych żłobkach rdzenia. Natomiast wzrost wartości prędkości wibracji, w niskim paśmie częstotliwości, skrajnych elementów jarzma rdzenia – ze wzrostem prądu uzwojenia stojana – jest związany głównie z osłabieniem mocowania najbliższych położonych elementów połączeń czołowych w tym obszarze [2, 4].

2.2. Wskaźniki oceny (i) elementu części stojana

Dla oceny stanu wibracyjnego i technicznego części stojana wykorzystano zdefiniowane wskaźniki diagnostyczne wraz z ich wartościami progowymi. Niektóre z nich, w formie przykładowo, przedstawiono poniżej.

Wskaźnik podstawowy dla (i) elementu (j) części stojana (jarzma zębów rdzenia, korpusu, połączeń czołowych uzwojenia w obszarze wsporników; główek) przy ocenie stanu wibracyjnego i technicznego.

$$\Delta v_{(i;j)[sr]} = v_{(i;j)[sr]} / v_{(j)dop} \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta v_{(i;j)[sr]}$ – wartość bieżąca [średnia] średniokwadratowa prędkości wibracji (i) elementu (j) części stojana, w niskim paśmie częstotliwości, $v_{(i;j)[sr]}$ odniesiona do wartości dopuszczalnej $v_{(j)dop}$ dla danej (j) części stojana.

Stan wibracyjny i techniczny (i) elementu (j) części stojana jest:

- b. dobry; gdy $\Delta v_{(i;j)[sr]} < 0.5$,
- dobry; gdy $0.5 \leq \Delta v_{(i;j)[sr]} < 1$,
- dopuszczalny (przejściowo); gdy $1 \leq \Delta v_{(i;j)[sr]} < 3$,
- zły; gdy $\Delta v_{(i;j)[sr]} \geq 3$ (2)

Wskaźnik uzupełniający I – sztywność (i) elementu (j) części jarzma i zębów rdzenia przy ocenie stanu technicznego.

$$\alpha v_{(i;j)\{sap\}Pmin/Pmax} = v_{(i;j)\{sap\}Pmin} / v_{(i;j)\{sap\}Pmax} \quad (3)$$

gdzie:

$\alpha v_{(i;j)\{sap\}Pmin/Pmax}$ – iloraz bieżących lub średnich {z aproksymacji przebiegu $v = f(P)$ } wartości średniokwadratowych prędkości wibracji (i) elementu (j) części stojana – jarzma i zębów rdzenia, w niskim paśmie częstotliwości, przy minimalnej i maksymalnej mocy czynnej turbogeneratorsa.

Sztywność ww. części stojana jest:

- b. dobra; gdy $\alpha v_{(i;j)\{sap\}Pmin/Pmax} < 1$; (0%*),
- dobra; gdy $1 \leq \alpha v_{(i;j)\{sr\}Pmin/Pmax} < 1.25$; (-20%*),
- dopuszczalna (przejściowo); gdy $1.25 \leq v_{(i;j)\{spr\}Pmin/Pmax} < 3$; (-30%*),
- zła; gdy $\alpha v_{(i;j)\{spr\}Pmin/Pmax} \geq 3$; (-40%*) (4)

Wskaźnik I zmniejsza lub zwiększa końcową wartość (K) podstawowego wskaźnika oceny stanu technicznego (i) elementu (j) części stojana – jarzma i zębów rdzenia $\Delta v_{(i;j)[sr]K}$ o +/- 10% jego wartości początkowej $\Delta v_{(i;j)[sr]}$, dla każdego innego jego poziomu wspólnej skali ocen obu rozpatrywanych wskaźników. Wskaźnik I zmniejsza wartość końcową podstawowego wskaźnika oceny (i) elementu (j) części stojana – połączeń czołowych uzwojenia w obszarze wsporników i główek prętów, $\Delta v_{(i;j)[sr](K)}$ o wartości procentowe podane w nawiasach (%*) w opisie jego oceny.

Wskaźnik uzupełniający II – mocowanie (i) elementów (j) części uzwojenia stojana przy ocenie stanu technicznego

$$\beta v_{(i;j)\{sap\}Imax / Imin} = v_{(i)e\{sap\}(Imax)} / v_{(i)e\{sap\}(Imin)} \quad (5)$$

gdzie:

$\beta v_{(i;j)\{sap\}Imax / Imin}$ – iloraz bieżących lub średnich {z aproksymacji przebiegu $v = f(I)$ } wartości średniokwadratowych prędkości wibracji (i) elementu (j) części stojana, w niskim paśmie częstotliwości, przy maksymalnym i minimalnym prądzie stojana.

Mocowania prętów uzwojenia jest:

- b. dobre; gdy $\beta v_{(i;j)\{sap\}Imax / Imin} < 1$ (0 %*),
- dobre; gdy $1 \leq \beta v_{(i;j)\{sap\}Imax / Imin} < 1.25$ (-20 %*),
- dopuszczalne (przejściowo); gdy $1.25 \leq \beta v_{(i;j)\{sap\}Imax / Imin} < 3$ (-30 %*),
- złe; gdy $\beta v_{(i;j)\{sap\}Imax / Imin} \geq 3$ (-40 %*)
- oraz $\beta v_{(i;j)\{sap\}Imax / Imin} \geq 9$ (-80 %*) (6)

Wskaźnik II dla (i) elementu (j) części uzwojenia w obszarze wsporników i główek prętów

zmniejsza lub zwiększa końcową wartość [K] podstawowego wskaźnika oceny $\Delta v_{(i;j)[\text{sr}](K)}$ o $\pm 10\%$ jego wartości początkowej $\Delta v_{(i;j)[\text{sr}]}$ dla każdego innego poziomu wspólnej skali ocen obu rozpatrywanych wskaźników. Wskaźnik II zmniejsza końcową wartość podstawowego wskaźnika oceny (i) elementu (j) części stojana – jarzma i zęba rdzenia $\Delta v_{(i;j)[\text{sr}](K)}$ o wartości procentowe podane w nawiasach (%*) w opisie jego oceny.

I tak np. dla (i) elementu główki pręta, którego wartość wskaźnika podstawowego określa jego stan techniczny jako b. dobry, a wskaźnika uzupełniającego II – jako dopuszczalny, to wówczas wartość końcową wskaźnika podstawowego wyznacza się z zależności:

$$\Delta v_{(i;\text{gp cz})[\text{sr}](K)} = \Delta v_{(i;\text{gp cz})[\text{sr}]}(1+0.3) \quad (7)$$

3. Programy komputerowe oceny stanu wibracyjnego i technicznego stojana turbogeneratora

3.1. Wprowadzenie

Opracowano programy komputerowe do automatycznej kompleksowej oceny stanu wibracyjnego i technicznego (i) elementu (j) części stojana turbogeneratora. Algorytmy zostały zaimplementowane w programach o nazwie Maps oraz Analizer. Programy te wykorzystują, zgromadzone w bazie danych systemu pomiarowego, sygnały wibracji czujników przyspieszeń zainstalowanych w elementach stojana.

3.2. Program komputerowy Maps

Program ten pozwala na obserwację stanu wibracyjnego stojana turbogeneratora. Głównym jego zadaniem jest prezentacja poziomów wibracji w postaci barwnych map (kolor: niebieski – stan b. dobry, zielony – stan dobry, żółty – dopuszczalny przejściowo, czerwony – zły) na płaszczyźnie P; Q wykresu obciążeń dopuszczalnych turbogeneratora.

Funkcjonalność programu:

- wybór typu i rodzaju mapy,
- prezentacja wartości progów oceny – b. dobry; dobry; dopuszczalny (przejściowo); zły,
- konstrukcja drzewa z gałęziami – (i) element (czujnik); (j) część stojana (zbiór

podobnych elementów); cały stojan (zbiór wszystkich części),

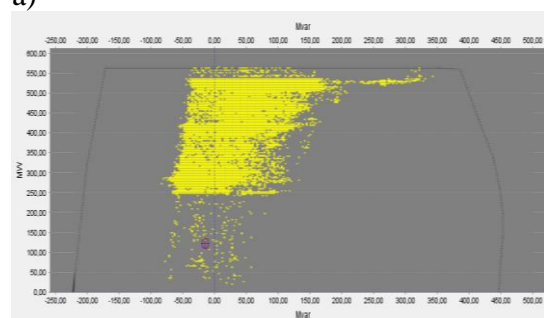
- generowanie wartości parametrów wibracji dla map w wybranym okresie pracy turbogeneratora,
- prezentacja map wibracji dla (i) elementu (j) części oraz całego stojana w funkcji mocy P; Q turbogeneratora,
- tworzenie jednoczesnych wykresów słupkowych wartości wibracji dla wszystkich punktów pomiarowych (czujników) przy danym obciążeniu P; Q.

Mogą być tworzone mapy prędkości [mms^{-1}] wibracji w kierunku: promieniowym, stycznym i osiowym dla poszczególnych elementów; ich grup (części) oraz całego stojana – w określonym czasie eksploatacji maszyny – w relacjach:

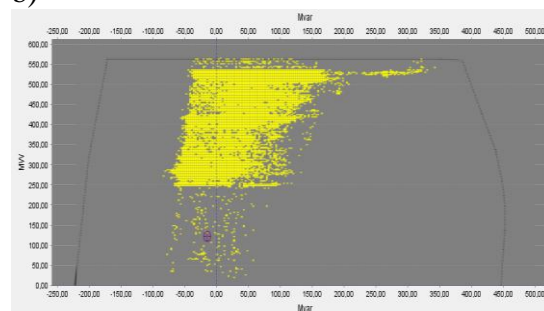
- największa wartość wibracji (najgorszy przypadek),
- najmniejsza wartość (najlepszy przypadek),
- średnia wartość (średnia arytmetyczna),
- ostatnia wartość wibracji przy danym obciążeniu P; Q.

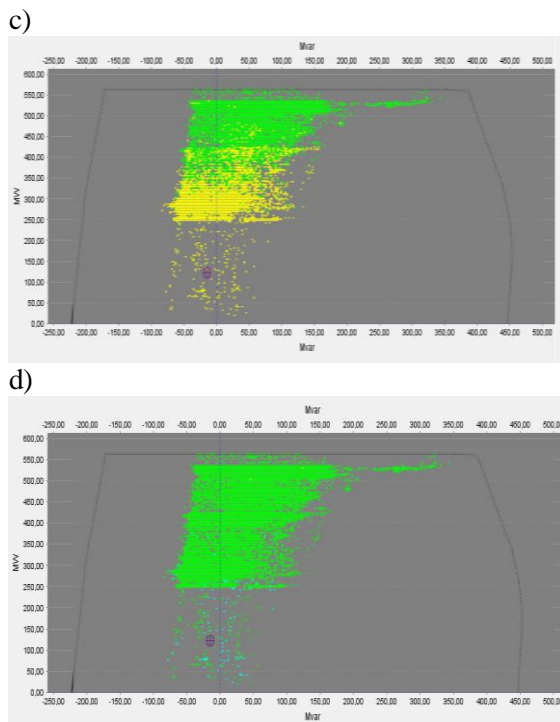
W przypadku wykorzystywania pomiarów pośrednich na korpusie stojana, dla oceny stanu wibracyjnego (i) elementu zębów rdzenia, tworzone są mapy przyspieszenia wibracji analogicznie położonego (i) elementu korpusu, w wysokim paśmie częstotliwości, w podobnych ww. relacjach.

a)



b)

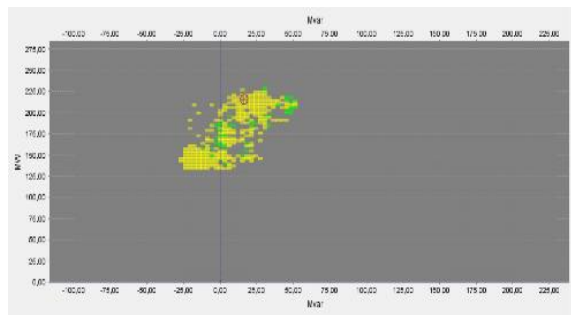




Rys. 1. Mapy największych skorygowanych wartości prędkości promieniowych wibracji stojana w obszarze obciążeń P;Q turbogenerators 560 MW a) wypadkowa całego stojana, b) wypadkowa jarzma rdzenia, c) wypadkowa korpusu d) wypadkowa połączeń czołowych uzwojenia w obszarze główek

W formie przykładu pokazano na rysunku 1 mapy największych skorygowanych wartości prędkości promieniowych wibracji stojana w obszarze obciążeń P; Q turbogenerators o mocy 560 MW.

Tworzone są także mapy stanu wibracyjnego zawieszenia rdzenia w obszarze podobnie położonych (i) elementów jarzma rdzenia oraz korpusu stojana. Obrazują one zmianę wartości harmonicznycy prędkości wibracji, w niskim paśmie częstotliwości, przenoszonych pomiędzy współpracującymi elementami, przy rozma-



Rys. 2. Mapa stanu wibracyjnego (i) elementu zawieszenia rdzenia stojana w obszarze godz. 12:00; str. turbiny turbogenerators 230 MW

itych poziomach degradacji tego węzła konstrukcyjnego podczas pracy turbogenerators (rys. 2).

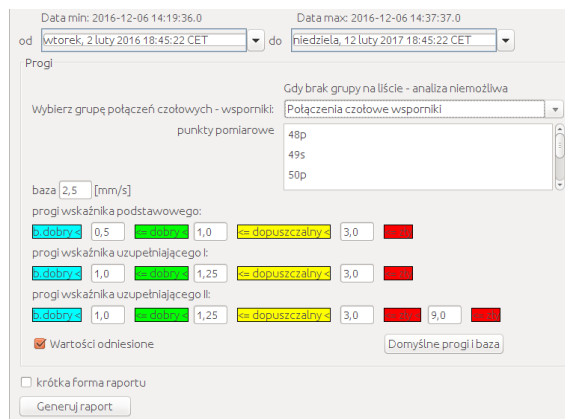
3.2 Program komputerowy Analzyer

Program ten służy do generowania zestawień tabelarycznych i raportów stanu technicznego stojana turbogenerators. W ocenie tego stanu są wykorzystywane wskaźniki przedstawione w punkcie 2 artykułu.

Program umożliwia ocenę stanu technicznego (i) elementu (j) części stojana – jarzma i zębów rdzenia, połączeń czołowych uzwojenia w obszarze ich wsporników i główek prętów oraz zawieszenia rdzenia w korpusie.

Poniżej przedstawiono ocenę stanu technicznego elementów połączeń czołowych uzwojenia stojana (od strony turbiny i pierścieni ślizgowycy) w obszarach ich wsporników.

Dla wygenerowania raportu oceny ww. elementów należy wprowadzić odpowiednie parametry analizy w oknie dialogowym (rys. 3).

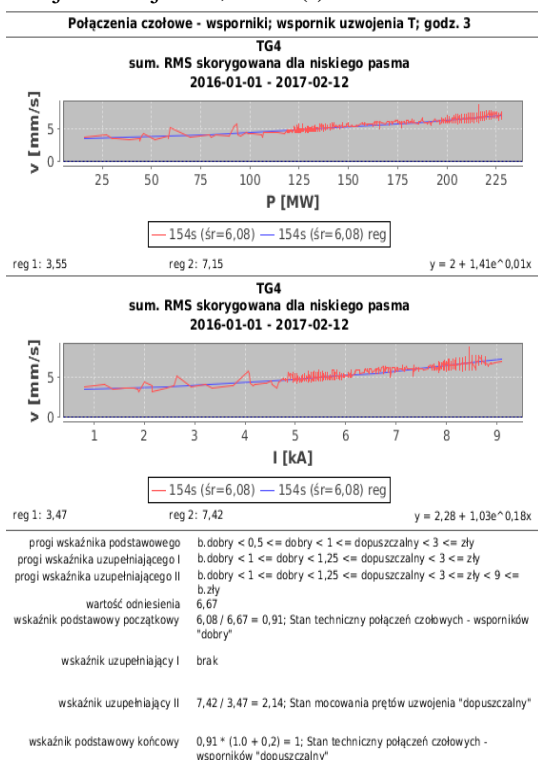


Rys. 3. Okno parametrów analizy stanu technicznego połączeń czołowych uzwojenia stojana w obszarach ich wsporników turbogenerators 230 MW

Określany jest przedział czasowy analizy, baza odniesienia (wartość dopuszczalna wibracji dla analizowanej części uzwojenia), progi wskaźników podstawowego i uzupełniającego I lub II oraz położenie czujników zainstalowanych w punktach pomiarowych. Przycisk „Domyślne próg i baza”, pozwala przywrócić domyślne wartości bazy i progów dla danej grupy elementów (czujników) w przypadku wprowadzenia innych ich wartości. Przycisk „Generuj raport” rozpoczyna proces wybierania danych z bazy danych, tworzenie i generowanie raportu. Raport jest przedstawiany w formie

rozbudowanej (zawiera wykresy i istotne wyniki z analizy przeprowadzonych pomiarów wibracyjnych stojana). W przypadku, gdy forma raportu może być bardziej zwięzła, należy zaznaczyć opcję „krótka forma raportu”.

Na rysunku 4 pokazano szczegółowy raport oceny stanu technicznego połączeń czołowych uzwojenia stojana w obszarach ich wsporników. W górnej jego części przedstawiony jest przebieg prędkości wibracji elementu połączeń czołowych w obszarze wspornika (godz. 3:00 od str. turbiny) w funkcji mocy czynnej P ; $v = f(P)$. Na jego podstawie program wyznacza wartość wskaźnika podstawowego oraz podejmuje decyzję dotyczącą wyznaczania wskaźnika uzupełniającego. W tym przypadku wartość prędkości wibracji rosła z mocą czynną i dlatego został wyznaczony wskaźnik uzupełniający II, z tworzonego dodatkowo wykresu wartości prędkości wibracji w funkcji prądu uzwojenia stojana I ; $v = f(I)$.



Rys. 4. Przykład szczegółowego raportu oceny stanu technicznego połączeń czołowych na spornikach uzwojenia stojana w obszarze str. turbiny; godz. 3:00 turbogeneratora 230 MW

W dolnej części raportu są zapisane założone wartości progów dla wszystkich wskaźników oceny oraz wyliczone wartości wskaźnika podstawowego (początkowy, końcowy) i uzupełniający II – korygujący wartość początkową

wskaźnika głównego. Na kolejnych stronach raportu podane są oceny stanu technicznego wszystkich pozostałych elementów połączeń czołowych uzwojenia stojana na jego wspornikach od str. turbiny i pierścieni ślizgowych.

4. Wnioski

1. Opracowana metoda automatycznej oceny stanu wibracyjnego i technicznego stojana turbogeneratora umożliwia:

- ciągłą i szybką analizę wyników pomiarów wibracyjnych wraz z ich interpretacją diagnostyczną dla wszystkich elementów istotnych części stojana,
- eliminowanie obciążeń elektrycznych P ; Q turbogeneratora (podczas jego eksploatacji), które mają istotny wpływ na poziom degradacji elementów części konstrukcyjnych,
- planowanie remontów stojana turbogeneratora i ich zakresu.

2. Metoda rozszerza znacznie możliwości diagnostyczne systemu monitoringu wibracji turbogeneratora – stworzonego w Instytucie Energetyki i wdrożonego w energetyce polskiej.

5. Literatura

- [1] Atamanov V.V. i drug.: Kontrol' sostojanija krajnich paketov aktivnoj stali turbogeneratora pod nagruzkoj. *Električeskie Stancii*, No. 6, 2005, c. 69 - 73.
- [2] Bytnar A.: Turbogenerator stator failures due to some physical phenomena. *Poznan University of Technology Academic Jurnal. Electrical Engineering* No 55, 2007, pp. 35-46.
- [3] Grigor'ev A.V. i drug.: O Vibracionnom kontro-le techničeskogo sostojanija statorov turbogeneratorov TGV-300. *Električeskie Stancii*, No 8, 1998, c. 27- 35.
- [4] Kumaraswamy et al.: Standardization of Absolute Vibration Level and Damage Factors for Machinery Health Monitoring *Proceedings of Vetomac - 2*, December 2002, pp.16 -18.
- [5] Pikul'skij V. A. i drug.: Vozmožnosti obecpeczenija nadežnoj ekspluatacii turbogeneratorov s dlitel'nym srokom služby. *Električeskie Stancii*, No 4, 2006, c. 51- 54.
- [6] Wróblewski S., Bytnar A. :Wybrane zagadnienia budowy systemu monitoringu i diagnostyki wibracyjnej turbogeneratorów. *Przegląd Elektrotechniczny nr 09a*, 2011, s. 176 – 180.