

Włodzimierz Przyborowski
Politechnika Warszawska Instytut Maszyn Elektrycznych
Jerzy Drosik
ALSTOM Power Sp. z o.o. w Warszawie Oddział we Wrocławiu,
R&D - Biuro Generatorów

PARADYGMATYCZNE ZASADY DIAGNOSTYKI WIRNIKÓW TURBOGENERATORÓW

THE PRINCIPLES OF TECHNICAL DIAGNOSTICS OF TURBOGENERATOR ROTORS

Streszczenie: W pracy przedstawiono elementy zasad diagnozowania stanu technicznego wirników turbogeneratorów. Problem rozpatrzono pod względem metodycznym w zakresie struktury rozmieszczenia i rodzajów sensorów oraz zasad analizy symptomów stanu technicznego wirników turbogeneratorów. Omówiono podstawowe wzorce symptomów stanu i ogólne zależności oceny rodzajów sygnałów diagnostycznych. Wskazano postulatywnie na zwiększenie oprzyrządowania diagnostycznego wirnika i określania podstawowych atrybutów i miar sygnałów diagnostycznych.

Abstract: The paper presents the elements of the principles of technical diagnostics of turbogenerator rotors. The problem examined in terms of methodology in terms of the structure of the distribution and types of sensors and principles of symptoms of the technical condition of turbogenerator rotors. Discussed the basic patterns of symptoms depending on the condition and overall assessment of the types of diagnostic signals. Indicated postulated to increase diagnostic instrumentation of rotor and determine the essential attributes and measures of diagnostic signals.

Słowa kluczowe: turbogenerator, monitoring, diagnostyka wirnika, czujniki, sygnały diagnostyczne.

Keywords: turbogenerator, monitoring, sensors, symptom diagnostic, examinations of rotors of synchronous generators.

1. Wstęp

Diagnostyka turbogeneratorów ma szczególne znaczenie we wszystkich jej aspektach, a więc monitorowaniu, diagnozowaniu i prognozowaniu stanu technicznego tych maszyn.

Doniosłość diagnostyki turbogeneratorów – Tbg uwarunkowana jest znaczeniem tych maszyn, jako podstawowych jednostek energetyki, a więc mających ważne znaczenie energetyczne, strategiczne, ekonomiczne i społeczne. Diagnostykę generatorów można rozpatrywać pod wieloma aspektami fizycznymi (cieplnym, mechanicznym, elektromagnetycznym) i w różnym rozmiarze technicznym w znaczeniu oprzyrządowania ustroju konstrukcyjnego turbogeneratora czujnikami i osprzętem pomiarowym [6, 9, 11]. Ma to bowiem znaczenie dla jednoznacznej, co do miejsca i poziomu, oceny procesów destrukcyjnych, postępujących w tych maszynach. Oczywistym jest stwierdzenie, że degradacja stanu technicznego, czyli występowanie niesprawności lub niezdatności, któregoś z podukładów lub węzłów kon-

strukcyjnych maszyny powoduje niesprawność innych jej elementów.

Pierwszoplanowe znaczenie ma niewątpliwie monitoring i diagnozowanie stanu technicznego wirnika – magneśnicy [1, 6, 9,10] z uwagi na wzbudzenie przez magneśnicę pierwotnego pola magnetycznego oraz doprowadzenie przez ten podzespół energii kinetycznej do generatora. Ponadto na magneśnicę oddziałują siły mechaniczne i elektromagnetyczne oraz podlega silnemu oddziaływaniu efektów cieplnych. Ważnym aspektem dla zdatnego funkcjonowania magneśnicy jest jej system chłodzenia oraz właściwe i niezawodne sprzężenie z turbiną bloku energetycznego. W celu więc zapewnienia efektywnego monitoringu i diagnostyki magneśnicy należy ustalić wzorcowe procedury akwizycji odpowiednich sygnałów. Odpowiedniość sygnałów oznacza ich naturę fizyczną i liczebność oraz spełnienie przez ich cechy pewnych warunków, aby diagnozowanie o stanie technicznym lub pojawiających się niesprawnościach i prognozowanie ich rozwoju miało wysoki poziom wiarygodności.

Paradygmatycznymi cechami sygnałów diagnostycznych – symptomów powinny być ich:

- jednoznaczność,
- czułość,
- informatywność,
- wielowymiarowość.

Zapewnienie wskazanych cech sygnałów diagnostycznych umożliwi właściwą detekcję uszkodzenia pojawiającego się w wirniku, jej dokładną lokalizację, czyli miejsce wystąpienia oraz identyfikację, czyli określenie rodzaju, rozmiaru i charakteru zmienności uszkodzenia.

Ogólnym zaleceniem, w celu rozwiązania postawionego problemu, jest znaczna liczebność czujników diagnostycznych, różnorodność fizyczna przetwarzanych sygnałów, duża liczba charakterystyk i sygnałów wzorcowych oraz możliwie duża ich wymiarowość, w znaczeniu liczebności ich parametrów i miar.

W pracy przeanalizowano rodzaje czujników do pomiaru głównych fizycznych sygnałów diagnostycznych oraz ich lokalizację w ustroju turbogeneratorskiego i formy przetwarzanych informacji, w znaczeniu analizy sygnałów, aby spełnić postulowane cechy symptomów diagnostycznych i zapewnić wysoki poziom wydajności diagnostycznych. Bardzo ważnym, choć niezwykle trudnym zagadnieniem w formułowaniu procedur diagnostycznych jest określenie możliwości pracy podukładu turbogeneratorskiego (bloku energetycznego) z wykrytym uszkodzeniem, aby nie dopuścić do stanu awaryjnego. A właśnie precyzowanie i formułowanie wskazanych atrybutów symptomów sprzyja tym procedurom.

2. Rodzaje i przyczyny niesprawności magnesu turbogeneratorskiego

Utrata uporządkowania własności generatora następuje w wyniku przemian energii w nim zachodzących i nieodzownej w tych przemianach dyssypacji – strat energii, których wynikiem jest wydzielające się ciepło w ustroju magnesu. Również rozpraszanie energii zarówno elektrycznej jak mechanicznej skutkuje stratami energii oraz efektami fizycznymi (resztkowymi), których następstwem są różne przyczyny niesprawności. Efekty fizyczne procesów resztkowych mają „charakter”: mechaniczny – wibracje i hałas; elektryczny – strumienie rozproszone i przepięcia oraz także skutek termiczny. Trzeba również mieć na uwadze, że awaryjność maszyn może być po-

wodowana także zaniedbaniami w procedurach ich eksploatacji. Należy stwierdzić, że efekty resztkowe są jednocześnie źródłami symptomów diagnostycznych. Ich różnorodność sprzyja ujednocznieniu symptomów i lokalizacji źródeł detekcji.

W zbiorze defektów elektrycznych wyróżnia się zwarcia zwojowe uzwojenia wzbudzącego, które następują wskutek miejscowego przegrzania izolacji przewodów, a zdarza się czasem, że rozszerzenie zwarć zwojowych prowadzi do zwarć doziemnych. Poza przyczynami termicznymi przyczyną zwarć zwojów są również oddziaływania – siły i naprężenia o naturze elektromagnetycznej i mechanicznej (jak siły bezwładnościowe). Następstwem zwarć zwojowych jest deformacja przewodów, utrudnienie przepływu czynników chłodzących, wzmożenie strat mocy i zwiększenie wydzielania ciepła i dalsza eskalacja zwarcia. Aż do metalicznego zwarcia zwojów. Groźnym przypadkiem defektu jest zwarcie połączeń czołowych uzwojenia wzbudzącego do powierzchni kołpaka, wskutek wytarcia się istniejącej izolacji pomiędzy prętami uzwojenia wirnika a kołpakiem. Zwiększenie wydzielania strat mocy wskutek zwarć powoduje naprężenia termiczne i dylatację przewodów uzwojenia wirnika, czego efektem jest deformacja uzwojenia oraz klinów i w konsekwencji, niewyważenie beczki wirnika. Eskaluje to wzmożeniem drgań całego wirnika. Konsekwencją zwarć zwojów uzwojenia wzbudzącego jest również asymetria w rozkładzie pola magnetycznego głównego strumienia wzbudzącego oraz zwiększenie rozprożeń żłobkowych. Należy podkreślić, że jest to przykład sprzężenia różnych efektów i rozszerzania się niesprawności wirnika.

Przyczyną niesprawności magnesu jest również zjawisko przepięć - wyładowań, choć mniej nasilone niż w uzwojeniu twornika, ponieważ napięcie wzbudzenia jest stosunkowo mniejsze.

Efekty mechaniczne skutkujące niesprawnościami to przede wszystkim drgania całego ustroju wirnika i łożysk spowodowane siłami elektromagnetycznymi i mechanicznymi. Niesprawności wirnika ujawniające się przekroczeniem kryterialnych wartości drgań są spowodowane niesymetrią sił mechanicznych i elektromagnetycznych, niesymetrią struktury wskutek przemieszczeń i odkształceń elementów konstrukcyjnych od oddziaływań mecha-

nicznych, elektrycznych i termicznych. Elementami tymi są pręty uzwojenia wzbudzącego, elementy uzwojenia tłumiącego, kliny i kołpaki. W rezultacie skutkuje to niewyważeniem wirnika.

W kołpakach efektami powodującymi ich niesprawność eksploatacyjną są mikropęknięcia czy szczeliny w ustroju konstrukcyjnym, spowodowane wszelkiego rodzaju oddziaływaniami elektromechanicznymi i naprężeniami termicznymi. Należy również zauważyć, że niektóre ze wskazanych usterek są wynikiem efektów procesów chemicznych zachodzących w magneśnicy między elementami konstrukcyjnymi, mediami chłodzącymi i płynami eksploatacyjnymi. Lista uszkodzeń elementów magneśnicy jest oczywiście obszerniejsza [6, 7, 8], ale mają one związek z powyżej wskazanymi. Oddzielnym zagadnieniem w sferze diagnostyki magneśnicy jest diagnozowanie o stanie technicznym systemów wzbudzących.

3. Symptomy stanu

W różnych typach maszyn ustala się różne zbiory symptomów stanu [2, 3]. W dużym stopniu zależy to od przebiegu zjawisk w nich zachodzących, od miejsc i węzłów konstrukcyjnych najbardziej newralgicznych i efektywności uzyskania sygnału pomiarowego. Różne są również zbiory pozyskiwanych sygnałów i ich analiza w celu uzyskania informacji diagnostycznej [3, 4]. Hierarchizacje zbiorów symptomów ustala się z zasady według stopnia wzmoczonych defektów, co związane jest z zachodzącymi w nich zjawiskami. Cechą znamioną maszyn elektrycznych jest zachodzenie w nich wszystkich rodzajów przemian energii, a więc znaczące symptomy mają naturę termiczną, wibracyjną i elektromagnetyczną. Należy podkreślić że właściwości eksploatacyjne wirnika generatora przynależą do problemów szeroko rozumianej klasy maszyn wirnikowych. Dlatego w diagnostyce tego podzespołu korzysta się z zasad wypracowanych m. in. w diagnostyce wibroakustycznej maszyn wirnikowych [3].

Maszyna synchroniczna, do klasy której zalicza się turbogeneratory, jest przetwornikiem energii opisanym wielowymiarowymi funkcjami stanu, silnie sprzężonymi z wieloma parametrami eksploatacyjnymi tych maszyn. Tak więc każdy sygnał diagnostyczny i parametr stanu technicznego maszyny powinien być ujednoznaczony ściśle ustalonymi zmien-

nymi i parametrami eksploatacyjnymi. Do podstawowych zmiennych charakteryzujących stan obciążenia Tbg zalicza się: U – napięcie na zaciskach, I prąd twornika, I_w prąd wzbudzenia, P – moc czynną, n – prędkość obrotową. Wielkości te w procedurach diagnostycznych przy wyznaczaniu wskazanych sygnałów diagnostycznych przyjmuje się jako parametry stanu, do których można zaliczyć współczynnik mocy $\cos\phi$, specyfikujący charakter obciążenia Tbg mocą bierną, oraz kąt obciążenia turbogeneratora.

Trudno jest zhierarchizować defekty w ustroju magneśnicy - wirnika turbogeneratora, ponieważ wiele z nich jest ściśle sprzężonych i następstwo defektów jest również wzajemnie wynikowe i są wieloprzyczynowe (wielowymiarowe) i wieloskutkowe, w znaczeniu powodowania dalszych niesprawności. Uważa się jednak, że funkcje i parametry stanu cieplnego, przede wszystkim uzwojenia wzbudzącego powinny być w sposób on-line monitorowane. Tak jak stan wibracyjny łożysk magneśnicy jest zawsze poddany ciągłej diagnozie. Zatem temperaturę można uznać za podstawową miarę stanu technicznego maszyny. Można więc postulować pierwszoplanowo rejestrację sygnałów temperaturowych wirnika:

$$\vartheta(\xi_k, t, \tau_T); \perp p_m = const$$

i równorzędną rejestrację sygnałów wibracyjnych

$$d\xi(\xi_k, t, \tau_T);$$

$$v\xi(\xi_k, t, \tau_T);$$

$$\perp p_m = const, m = 1, 2, 3, \dots$$

$$a\xi(\xi_k, t, \tau_T);$$

$$W(\omega_n, t, \tau_T)$$

gdzie: d oznacza przemieszczenie drgań, v prędkość, a przyspieszenie (wyznaczane dla składowej radialnej i tangencjalnej), $W(\omega)$ widmo częstotliwościowe; $\xi_k - k = 1, 2, 3$ współrzędne układu parametryzującego ustrój magneśnicy do lokalizacji czujnika diagnostycznego, t czas bieżący diagnozowania, τ_T - czas eksploatacji Tbg , p_m ustalone parametry stanu w procedurach diagnostycznych.

Należy jednak mieć na uwadze, że przekroczenie wartości kryterialnych temperatury czy drgań (amplitud prędkości drgań) tych elementów magneśnicy i w konsekwencji osiągnięcie stopnia niezdatności do spełnienia za-

dań eksploatacyjnych może mieć wielorakie przyczyny i różną lokalizację „źródeł” pierwotnych, jako przyczyn rozwijających się niesprawności. Dlatego zaobserwowane symptomy jednego rodzaju fizycznego należy konfrontować z symptomami innego rodzaju.

Kolejnym sygnałem diagnostycznym jest wielkość magnetyczna np. w reprezentacji indukcji magnetycznej, lub napięć indukowanych w cewkach diagnostycznych, których sygnały są zorientowane do oceny równomierności i symetrii rozkładu głównego strumienia magnetycznego:

$$B_{\xi}(\xi_k, t, \tau_T); \perp p_m = const$$

$$u_i(\xi_k, t, \tau_T); \perp p_m = const$$

Do oceny rozkładu pola istotne są dwie składowe indukcji: B_r - radialna i B_{ϕ} - tangencjalna, ponieważ zwarcia zwojowe silnie wpływają na rozproszenia żłobkowe.

Należy zaznaczyć że w ocenie stanu technicznego maszyny mają znaczenie podstawowe parametry maszyny, głównie parametry obwodowe jak rezystancje i reaktancje uzwojeń, rezystancje izolacji uzwojeń itp. które również służą do zapewnienia wskazanych atrybutów symptomów.

4. Lokalizacja sensorów diagnostycznych

Pomiary parametrów symptomów diagnostycznych magneśnicy są wyjątkowo trudne ze względu na ruch obrotowy i odrębność strukturalną tego podzespołu turbogeneratora. Wymaga to wprowadzenia czujników i osprzętu pomiarowego do wnętrza maszyny. Problemem jest przede wszystkim zabezpieczenie czujników żeby nie stały się przyczyną zakłócenia pracy bądź niesprawności maszyny, a są to przypadki nieodosobnione, choć coraz rzadziej doświadczane.

W celu zwiększenia informacji diagnostycznej stanu magneśnicy staje się konieczne eksplorowanie symptomów stanu magneśnicy za pośrednictwem czujników zainstalowanych w szczeliny przywornikowej. Dostępną i dopuszczalną strefą jest górny podobszar szczeliny o następującym rozmiarze radialnym i obwodowym:

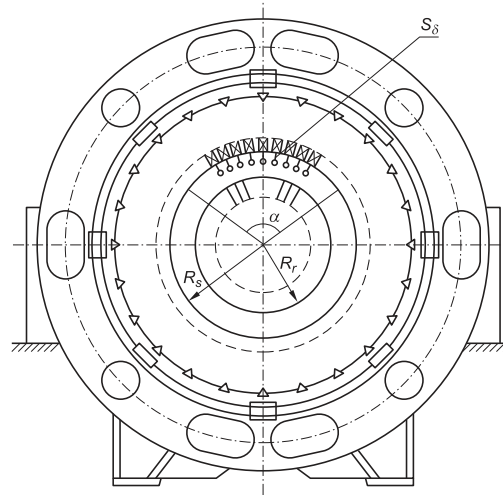
$$S_{\delta} = \{R_w < R_r + (0.7 - 0.9)\delta < R_s; -\pi/3 < \alpha < +\pi/3\}, \quad (\text{rys. 1})$$

gdzie: R_r promień beczki wirnika, R_s we-

wnętrzny promień rdzenia stojana, δ szerokość szczeliny powietrznej.

Różne czujniki zainstalowane w tej strefie S_{δ} mogą być umieszczone na statywach przymocowanych do klinów żłobkowych stojana. Położenie aksjalne (wzdłuż długości maszyny) jest uwarunkowane dogodnością przeprowadzenia przewodów pomiarowych do przepustu pomiarowego w kadłubie maszyny.

Mogą więc być w strefie szczeliny zainstalowane czujniki do pomiaru składowych indukcji magnetycznej (radialnej i tangencjalnej), cewki pomiarowe napięć, kamery termowizyjne, obiektywy laserowe do pomiaru drgań wirnika i wału wirnika, anteny do detekcji wyładowań niezupełnych.



Rys.1. Oznaczenie strefy S_{δ} lokalizacji czujników w obszarze szczeliny przywornikowej turbogeneratora

Ujednoznaczenie i zwiększenie informatywności symptomu stanu temperaturowego magneśnicy wymaga zwielokrotnienia czujników w wymiarze aksjalnym i co najmniej w dwu sekcjach w wymiarze tangencjalnym.

Podobny rozkład czujników indukcji magnetycznej i cewek pomiarowych rozszerzy atrybuty symptomu stanu magnetycznego magneśnicy. Przy czym należy dodatkowo uściślić rozkład tych czujników w kierunku tangencjalnym, aby umieszczone były w odległości $\tau_p / 2$ (τ_p - podziałka biegunowa), a nawet w

rozszerzonej strefie S_{δ} o kąt $\pm \pi / p$ (p - liczba par biegunów).

Najtrudniejsze i o małym stopniu jednoznaczności i czułości sygnałowej są pomiary

temperatury elementów magnesnicy. Natomiast metodami termowizyjnymi, za pośrednictwem kamer zainstalowanych w obszarze szczeliny przywornikowej, monitoring powierzchni magnesnicy jest realny i dostateczny do określenia symptomów termicznych.

Ważny i względnie prosty jest tylko pomiar drgań i temperatury łożysk wirnika turbogeneratorsa, czujnikami zainstalowanymi w korpusie stojaków łożysk.

Pomiar drgań beczki i wału wirnika czujnikami wewnętrznymi jest utrudniony przemieszczaniem się czujników (czyli drgających) względem drgającego obiektu badanego. Ale przy znajomości drgań czujnika interferencja tych dwu sygnałów może być interesującym symptomem pod względem informatywności. Parametryzację miejsc zainstalowanych czujników pomiarowych należy ściśle określać zespołem współrzędnych cylindrycznych $C(r, \varphi, z)$ - ξ_k skalowanych: metrycznie w położeniu radialnym - r , obwodowo położeniem godzinowym $\langle 1, \dots, 12 \rangle$ - φ oraz sektorowo $\langle I, \dots, X \rangle$ lub metrycznie (licząc od strony turbiny) w kierunku aksjalnym - z .

Nie rozstrzygając kwestii liczby i sposobu (czy wręcz technologii) zamocowania sensorów sygnałów diagnostycznych w ustroju magnesnicy, istotnym wsparciem diagnostyki tego podzespołu byłyby czujniki fabrycznie instalowane w obszarze szczeliny przywornikowej. Ważnym zagadnieniem w tej kwestii jest standaryzacja instrumentacji pomiarowej odnośnie do zastosowanych czujników, okablowania, łączników i przepustu pomiarowego w kadłubie, co właśnie na etapie produkcji maszyny może być ustalone i zainstalowane.

5. Charakterystyki i sygnały wzorcowe oraz miary diagnostyczne

Do oceny stanu technicznego maszyny służą nie tylko sygnały uzyskane z detekcji specjalizowanych czujników, ale również parametry zmiennych stanu maszyny wyrażone np. współczynnikiem zawartości harmonicznych w napięciu, a także odpowiednie charakterystyki jej zmiennych stanu.

Dla magnesnicy stosownymi charakterystykami do oceny diagnostycznej po czasowych okresach eksploatacyjnych T_{bg} są następujące charakterystyki:

- nagrzewnia, czyli przebiegu temperatury w funkcji czasu w ustalonych punktach lub stre-

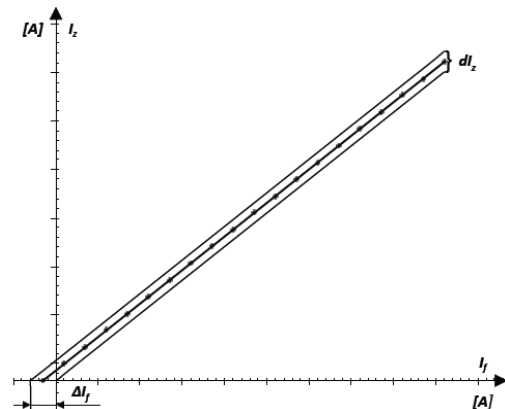
fach magnesnicy i ustalonych warunkach stanu eksploatacyjnego określonego mocą czynną, prądem twornika i współczynnikiem mocy $\vartheta = f(t) \perp [P, I, \cos \varphi] = const$

lub przebieg temperatury w stanie bezobciążeniowym przy ustalonym prądzie wzbudzenia, wykres ten stanowiłby charakterystykę wzorcową;

- stanu jałowego, a więc funkcja napięć indukowanych w poszczególnych pasmach fazowych w zależności od prądu wzbudzenia i przy ustalonej prędkości, która mogłaby być parametrycznie ustalona dla kilku wartości prędkości obrotowej

$$U_{iK} = f(I_f) \perp n_k = const$$

$$K = U, V, W; k = 1, 2, 3$$



Rys.2. Wzorcowa charakterystyka zwarcia z oznaczonymi dopuszczalnymi przedziałami niezgodności wartości symptomu

- zwarcia ustalonego, które również stanowią wzorce do wykrycia i oceny ewentualnych usterek przede wszystkim w uzwojeniach maszyny

$$I_{zK} = f(I_f) \perp n = const, K = U, V, W$$

Wskazane charakterystyki wyznaczone dla turbogeneratorsa nowo wyprodukowanego stanowią charakterystyki wzorcowe - $U_{iK}^{(w)}, I_{zK}^{(w)}$

Miarą porównawczą i kryterium oceny są różnice między charakterystykami wzorcowymi i wyznaczonymi

$$d_s U_i = |U_{iK}^{(w)} - U_{iK}|, \perp I_f, n_k$$

(1)

$$d_s I_z = |I_{zK}^{(w)} - I_{zK}|, \perp I_f, n \quad (2)$$

po ustalonym okresie eksploatacji związanym z przeglądem i/lub remontem bloku energetycznego. Różnica ta jest parametrem symptomalnym. To znaczy przekroczenie tej miary

względem wartości usankcjonowanej normami można uznać za stan niesprawnościowy.

Wskazane miary parametrów symptomalnych można zastosować do innych charakterystyk eksploatacyjnych bądź do wybranych punktów tych charakterystyk. Przykładowo może to być punkt obciążenia znamionowego dla wartości prądu wzbudzenia przy parametrycznej zmianie współczynnika mocy

$$d_s I_f = |I_{f\phi}^{(w)} - I_{f\phi}|, \perp U_N, I_N, : \cos \phi_{ind}, \cos \phi_{poj}$$

(3)

Na podstawie eksperymentalnego materiału diagnostycznego i materiału z przeglądów i remontów *Tbg* można określić wartości kryterialne do oceny sprawności i zdatności maszyny w sytuacji przekroczenia tych kryteriów

$$\varepsilon d\chi_k > d\chi_k$$

gdzie $\chi_k \leftrightarrow U_{if}, I_z, I_f$

Do wzorcowych charakterystyk aspektu mechanicznego badań diagnostycznych można ustalić pomiary drgań magnesnicy w najprostszym eksperymencie ze względu na stan eksploatacyjny. Pierwszy dotyczyłby zestawu pomiarów drgań; na korpusach łożysk, oraz w wybranych punktach na kadłubie maszyny w stanie jałowym dla wybranych stanów wzbudzenia.

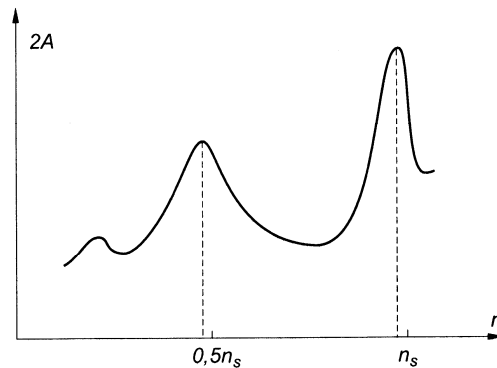
Drugą charakterystyką, a w zasadzie przebiegiem, jest zależność drgań zarejestrowanych na kadłubach stojaków łożysk, (ale również kadłubie *Tbg*) w funkcji prędkości obrotowej w stanie wybiegu wirnika.

$$\{a_\xi; v_\xi, d_\xi\} = f(\xi_k, n, \tau); \perp I_{f_m} = const,$$

$$m = 1, 2, 3, \dots$$

Wzorcowe przebiegi mogą być wykonane dla różnych prądów wzbudzenia.

Przebiegi te są ważne z wielu powodów. W wartościach częstotliwości rezonansowych (na ogół trzech) ujawniają się różne defekty wirnika spowodowane dylatacjami elementów konstrukcyjnych magnesnicy (klinów żłobkowych, prętów uzwojenia tłumiącego, prętów uzwojenia wzbudzającego). Na poziom wibracji w stanie wybiegu ma silny wpływ ekscentryczność szczeliny przywirnikowej, co można zidentyfikować tymi pomiarami przy różnych prądach wzbudzenia.



Rys.3. Przykładowy wzorcowy przebieg amplitud przemieszczeń drgań łożyska w funkcji prędkości obrotowej, podczas wybiegu turbogeneratora.

Charakterystyki te są również podstawą do sformułowania matematycznego modelu diagnostycznego z ustalonym poziomem residuów – różnicy sygnału eksperymentalnego i teoretycznego. Dlatego charakterystyki wibracyjne w stanie wybiegu powinny być zamieszczone w katalogu podstawowych charakterystyk turbogeneratora z pełną ich analizą.

Ogólnym zaleceniem w dziedzinie diagnostyki jest formułowanie związków funkcjonalnych i wielowymiarowych do oceny własności sygnałów diagnostycznych, choć nieuniknione są również cechy punktowe. Natomiast do wskazania symptomów i oceny stanu technicznego i w rezultacie podjęcia decyzji diagnostycznych należy sformułować odpowiednie miary szeroko rozumianych sygnałów, do których zalicza się sparametryzowane charakterystyki $S_p \chi_{z1; z2}$ zmiennych stanu (χ_{z1}, χ_{z2}) i przebiegi zmienne w czasie $S(t)$. Tak więc analogicznie do wyrażeń (1- 3) miarą oceny symptomu jest różnica, czyli odległość charakterystyk (lub sygnałów).

$$d_s S_k \chi = |S_k^{(w)} \chi - S_k \chi|, \perp p_N = const \quad (4)$$

Żeby uzyskać zwiększoną czułość symptomu wielkości różnicowej charakterystyk, należy również określić miarę odległości dla pochodnych charakterystyk symptomalnych względem zmiennej, w funkcji której są wyznaczone charakterystyki

$$d_s^d S_k \chi = |S_k^{d(w)} \chi - S_k^d \chi|, \perp p_N = const$$

(5)

W analizie wyznaczonych charakterystyk symptomalnych znaczenie mają również

zmienności parametryczne, a więc również badanie odległości rodzin charakterystyk

$$d_s S_{kPn} \chi = |S_{kPn}^{(w)} \chi - S_{kPn} \chi| \quad (6)$$

Znacznie obszerniejszym zbiorem ocen podlegają symptomy wielkości fizycznych zmiennych w czasie, czyli sygnałów $S(t)$. Podstawową procedurą jest wyznaczanie parametrów podobieństwa symptomów do sygnału wzorcowego

$$S_w(t) = \alpha_1 S_s \left(\frac{t - \alpha_2}{\alpha_3} \right) + \alpha_4 \quad (7)$$

gdzie α_k ($k=1,2,3,4$) są parametrami podobieństwa.

Poza dość obszernym zbiorem parametrów sygnałów, spośród których najważniejszymi są wartości szczytowe, średnie, skuteczne oraz ich widma częstotliwościowe oraz wielkości bezwymiarowe – dyskryminanty, jak współczynniki kształtu, harmoniczności itp. duże znaczenie mają wielkości utworzone w wyniku działań operatorowych na sygnałach.

Do podstawowych, poza zwykłymi operacjami całowania i różniczkowania zalicza się transformacje fourierowskie lub falkowe.

Również w dziedzinie sygnałów formułuje się, na podstawie wielkości analogicznych do metryk w przestrzeniach funkcyjnych, wielkości miar ich podobieństwa

$$\rho_\alpha(S_w, S) = \frac{1}{\tau} \left[\int_{t_1}^{t_2} |S_w(t) - S(t)|^\alpha dt \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (8)$$

w których wielkością bazową jest sygnał wzorcowy $S_w(t)$.

Ujawnienie osobliwości cech symptomów można uzyskać na podstawie funkcji utworzonych z przemnożenia sygnału pomierzonego z sygnałem wzorcowym

$$Y_{S,S_w}(t, \tau, \xi_k) = S(t, \tau) \times S_w(t) \quad (9)$$

przy czym sygnał wzorcowy może być tej samej natury fizycznej co wyznaczony symptom lub też innej wielkości fizycznej, ale o cechach niezmienniczości.

Ważne jest w tej operacji określenie punktu bazowego ustalonego np. jako jeden z punktów przejścia przez zero tych przebiegów.

Na szczególnie wyróżnienie zasługują operacje splotu i to nie tylko do oceny sygnałów losowych za pośrednictwem funkcji korelacji. Ale właśnie operacja splotu sygnałów z ich wzorcami (autokorelacja) lub z sygnałami danego procesu diagnostycznego, ale uznanego za sy-

gnał bazowy czy inwariantny, ma istotne znaczenie w ustaleniu jednoznaczności i informatywności wyznaczonego i analizowanego symptomu.

Funkcje splotu można obliczać dla ustalonego arbitralnie, ale jednoznacznie, interwału T_τ obserwacji mierzonego symptomu $S(t)$

$$\Gamma(t) = \frac{1}{T_\tau} \int_0^{T_\tau} S(t-t^*) S_w(t^*) dt^* \quad (10)$$

$S_w(t)$ - jest sygnałem wzorcowym.

Jak zaznaczono natura sygnału wzorcowego może być różna od symptomu, lecz powinien to być sygnał regularny, periodyczny i niezmienniczy pochodzący z badanej maszyny. Sygnałem takim może być napięcie fazowe lub prąd twornika, sygnał drganiowy monoharmoniczny itp.

Korelowanie sygnału symptomalnego z sygnałem o innej naturze fizycznej w celu wykrycia defektu należy do metod tak zwanej diagnostyki subpośredniej [8], stosowanej w sytuacji współpracy urządzeń elektrycznych z mechanicznymi.

W celu zidentyfikowania osobliwości w funkcji splotu może być ona poddana standardowym operacjom i złożeniom w znaczeniu np. utworzenia portretów fazowych.

Z różnych miar sygnałów pomiarowych i ich cech stanowiących symptomy stanu można tworzyć multiwektory symptomalne sparametryzowane czasem eksploatacji generatora, które stanowiąc będą normę stanu technicznego dogodną do oceny stanu bieżącego i prognozy dalszej eksploatacji w sytuacji przekroczenia niektórych wartości kryterialnych.

$$N_n S_k(\tau) = [N_{11}(S_1, \tau), N_{12}(S_2, \tau), \dots, N_{1k}(S_k, \tau), \dots, N_{nn}(S_n, \tau), N_{n(n-1)}(S_{n-1}, \tau), \dots, N_{n1}(S_1, \tau)], \\ n = 1, \dots, N$$

Należy zauważyć, że elementy wskazanego multiwektora o jednakowych wskaźnikach $N_{nn}(S_n, \tau)$ są również zbiorem uporządkowanym stanowiącymi subwektory obejmujący różne miary danego sygnału diagnostycznego.

6. Uwagi końcowe

Ze względu na znaczny postęp w technice pomiarów i akwizycji sygnałów pomiarowych z wykorzystaniem systemów pomiarowych może być znacznie rozszerzona diagnostyka

maszyn elektrycznych granicznych mocy – turbogeneratorów w celu zwiększenia ich niezawodności i zdatności eksploatacyjnej. Szczególnym monitoringiem powinny być objęte wirniki – magneśnice tych maszyn. Pewien stopień oprzyrządowania turbogenerato- ra, co do rodzaju czujników diagnostycznych oraz liczby i miejsc ich instalacji, powinien być na etapie jego produkcji usankcjonowa- nym wymogiem.

Oprócz jednak strony technicznej pomiarów i oprzyrządowania powinna być zastosowana odpowiednia metodyka pomiarów i specyfika- cja cech symptomów stanu maszyny. Opraco- wanie cech sygnałów powinno zmierzać do ich ujednoznacznienia, wyznaczania sympto- mów niezależnych, co zwiększa zbiór infor- macji, i tworzenia zbioru pełnego parame- trów symptomów stanu.

Powiększenie liczby miar sygnałów sympto- malnych, a w szczególności porównań według różnych miar metrycznych do sygnałów wzor- cowych tej samej natury, ale również o innej naturze fizycznej zwiększy stopień ujedno- znacznienia, czułości i informatywności wyzna- czonych symptomów.

7. Literatura

- [1]. Biela J., Macek-Kamińska K.: *Badania dia- gnostyczne wirników generatorów synchron- nych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napę- dów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wro- cławskiej Nr 62/2008.
- [2] Red. Cempel C., Tomaszewski F.: *Diagnostyka maszyn Zasady ogólne . Przykłady zastosowań*. MCNEMT Radom 1992
- [3] Cempel Cz.: *Podstawy wibroakustycznej dia- gnostyki maszyn*. WNT, Warszawa 1982.
- [4] Cholewa W., Moczulski W.: *Diagnostyka tech- niczna maszyn Pomiar i analiza sygnałów* Skrypt Politechniki Śląskiej nr 1758 Gliwice 1993.
- [5] Colak I., Garip I., Sagirolu S., Bayhan S.: *Re- mote monitoring of the load characteristics of syn- chronous generators*, Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011 Inter- national Conference on , vol., no., pp.1,4, 11-13 May 2011
- [6] Glebow I.A., Danilewicz Ja.B.: *Diagnostika turbogeneratorow*, Nauka, Leningrad 1989.
- [7] Glinka T.: *Badania diagnostyczne maszyn elek- trycznych w przemyśle*. Katowice 1999
- [8] Przyborowski W.: *Uwagi o metodzie diagno- styki subpośredniej zespołów napędowych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Nr 49 Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały Nr 21 / 2000
- [9] Przybysz J.: *Turbogeneratory Diagnostyka i eksploatacja* WNT Warszawa 1987.
- [10] Szymaniec S., Rydlik P.: *Diagnostyka wirni- ków generatorów synchronicznych na etapie ich remontu i retrofitu*. Zeszyty Problemowe – Maszy- ny Elektryczne Nr 1/2014 (101)
- [11] Vrazic M., Maljkovic Z., Kovacic M., Hanic Z.: *Synchronous generator monitoring system as a tool for power grid diagnostics*. Cigré SC A1 Col- loquium on Large Electrical Machines and Renew- able Generation, Bucharest, Romania, 03-04 Sep- tember, 2013.

Autorzy

Dr hab. inż. Włodzimierz Przyborowski
e-mail: W.Przyborowski@ime.pw.edu.pl
Instytut Maszyn Elektrycznych
Politechnika Warszawska
00-662 Warszawa, Pl. Politechniki 1
Mgr inż. Jerzy Drosik
e-mail: jerzy.drosik@power.alstom.com
Group Leader and Principal Engineer Turbogenerator
Mechanical Design
ALSTOM Power Sp. z o.o. w Warszawie Oddział we
Wrocławiu,
R&D - Biuro Generatorów
53-609 Wrocław, ul. Fabryczna 10