



Zalecenia techniczne i metodyczne diagnostyki turbogeneratorów

WŁODZIMIERZ PRZYBOROWSKI

Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Maszyn Elektrycznych,
00-661 Warszawa, Pl. Politechniki 1, wlodzimierz.przyborowski@el.pw.edu.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono elementy zasad diagnozowania stanu technicznego turbogeneratorów. Problem rozpatrzono pod względem metodycznym w zakresie rodzajów sensorów i struktury ich rozmieszczenia oraz zasad analizy symptomów stanu technicznego tych maszyn. Wskazano postulatywnie na zwiększenie diagnostycznego oprzyrządowania turbogeneratora i określanie podstawowych miar i cech sygnałów diagnostycznych. Omówiono podstawowe wzorce sygnałów diagnostycznych i zaproponowano ogólne zależności transformacji i oceny tych sygnałów. Celem takiego ujęcia jest zwiększenie jednoznaczności, czułości, informatywności i wielowymiarowości symptomów stanu.

Słowa kluczowe: diagnostyka, turbogenerator, monitoring, sygnały diagnostyczne

DOI: 10.5604/12345865.1186226

1. Wstęp

Pomimo osiągnięcia w konstrukcji turbogeneratorów (*tbg*) standaryzacji w zakresie: struktury uzwojeń obwodu twornika i magneśnicy, struktury rdzeni i ich zblachowania, systemów chłodzenia, systemów wzbudzających oraz pomimo znacznego postępu w materiałach konstrukcyjnych obwodów elektrycznych i rdzeni oraz zawieszzeń, pozostaje problem zwiększania ich niezawodności i utrzymania bezawaryjnej eksploatacji [4, 5, 9, 10].

Ważność zapewnienia wysokiej niezawodności turbogeneratorów jest uwarunkowana znaczeniem tych maszyn jako podstawowych jednostek energetyki, a więc mających doniosłe znaczenie energetyczne, strategiczne, ekonomiczne i społeczne.

Zapewnienie niezawodności i pełnej zdatności turbogeneratorów w okresach międzyprzeglądowych, wynoszących niekiedy kilkanaście miesięcy, wymaga stosowania właściwego systemu diagnostycznego, utworzenia odpowiedniego monitoringu wybranych sygnałów diagnostycznych oraz diagnozowania i prognozowania powstających defektów [1, 5, 8, 10].

Poza bezpośrednimi przyczynami tych defektów spowodowanymi procesami dyssypatywnymi, prowadzącymi do procesów cieplnych, i zjawiskami resztkowymi, jak wibracje i wyładowania niezupełne, mogą się one nasilać wskutek niesprawności lokalnych. Niesprawnościami lokalnymi są wszelkiego rodzaju zwarcia zarówno przewodów, jak i blach pakietów. Postęp w dziedzinie materiałów konstrukcyjnych: izolacji, blach i materiałów konstrukcyjnych o podwyższonej wytrzymałości będzie powodował modyfikacje konstrukcji elementów i podzespołów turbogeneratorów. Należy jednak mieć na uwadze zmiany związków konstytutywnych wskutek tak zwanego „starzenia się” parametrów materiałowych, mechanicznych i elektrycznych.

W ogólnej klasyfikacji można wskazać na diagnostykę stojanów i wirników. W szczegółowej klasyfikacji wskazuje się na diagnostykę obwodów elektrycznych i magnetycznych (rdzeni) tych podukładów oraz ich węzłów konstrukcyjnych. Węzły konstrukcyjne stojana to oczywiście zawieszenie i elementy mocujące rdzeń stojana w kadłubie. Węzłami wirnika są łożyska maszyny i sprzęgnięcie z turbiną oraz kołpaki osłaniające części połączeń czołowych uzwojenia wzbudzającego.

Oprócz sfery technicznej i instrumentacyjnej pomiarów diagnostycznych — aspektu *hardwerowego*, bardzo ważnym zagadnieniem jest sfera *softwerowa* dotycząca utworzenia zbioru sygnałów oraz ich miar i wydzielenia cech istotnie właściwych dla symptomów diagnostycznych.

Usprawnienie detekcji sygnałów diagnostycznych oraz zwiększenie ich jednoznaczności i wiarygodności wymaga spełnienia przez ich cechy odpowiednich warunków. Cechy te można uznać za pewnego rodzaju wzorzec metodyczny — paradygmatyczny, badań diagnostycznych. Paradygmatycznymi cechami sygnałów diagnostycznych powinny być ich:

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

Uwarunkowania te są ważne w przypadku turbogeneratorów, ponieważ przyczyny powstających w nich defektów i niesprawności są różnej natury fizycznej (elektrycznej, magnetycznej, mechanicznej) i ujawniają się we wzajemnie sprzężonych sygnałach diagnostycznych o różnej naturze fizycznej.

Jednoznaczność oznacza odpowiedniość jednoznaczną między cechami sygnału lub zbiorem uporządkowanych cech sygnałów diagnostycznych stanowiących symptom stanu maszyny a zaistniałą w ustroju maszyny niesprawnością lub niezdatnością. Przy czym wydzielone sygnały określonego symptomu mogą mieć różną naturę fizyczną.

Czułość jest miarą zmiany sygnału diagnostycznego względem postępującej niesprawności. Informatywność oznacza możliwie największą ilość informacji o zaistniałej i postępującej niesprawności elementów ustroju maszyny. Informacje te ujęte są zbiorem odpowiednio opracowanych cech symptomów (o różnej naturze fizycznej). Symptomy stanu powinny spełniać warunek jednoznaczności, być niezależne i stanowić zupełność określenia niesprawności.

Wielowymiarowość określa odpowiednią liczebność parametrów i miar symptomu stanu oraz miar wynikających z korelacji wyróżnionego sygnału symptomalnego z innymi sygnałami diagnostycznymi.

Spełnienie wskazanych cech sygnałów diagnostycznych, symptomów, jest możliwe przy zastosowaniu właściwej detekcji uszkodzenia w znaczeniu: rodzaju, stopnia nasilenia i miejsca wystąpienia oraz pozwoli zidentyfikować charakter zmienności uszkodzenia. Tak więc zapewnienie wskazanych atrybutów symptomów wymaga odpowiedniego oprzyrządowania badanej maszyny, ale również obróbki i analizy sygnałów diagnostycznych w celu wyznaczenia symptomów stanu technicznego maszyny wskazujących na powstające defekty. Warunkiem koniecznym jest także sformułowanie odpowiednich miar symptomów [2, 3, 5].

2. Przyczyny niesprawności elementów i podzespołów turbogeneratorsa

Głównymi procesami fizycznymi, wskutek których następuje pogorszenie stanu technicznego turbogeneratorsa, są procesy cieplne, wibracyjne i wyładowsania niezupełne [8]. Pierwsze są wynikiem dyssypacji energii w uzwojeniach, rdzeniach i elementach konstrukcyjnych. Następne przyczyny są wynikiem tak zwanych procesów resztkowych spowodowanych przemianami energii i różnego rodzaju sił oddziałujących w tych maszynach. W poszukiwaniu przyczyn degradacji różnych elementów i węzłów konstrukcyjnych (zawieszenia rdzenia, kołpaki) należy również wziąć pod uwagę pogarszanie własności materiałowych i to zarówno mechanicznych, jak i elektrycznych. Pogorszenie własności izolacji uzwojeń wskutek oddziaływań elektromagnetycznych i lokalnych przegrzań powoduje zwiększenie efektów wyładowsań niezupełnych i prowadzi w konsekwencji do efektu napięciowego przebicia izolacji [5, 6, 8].

Procesy cieplne i szeroko rozumiane oddziaływania (siły i naprężenia) powodują przeciążenia cieplne izolacji i odkształcenia prętów uzwojeń, których efektem szczególnie narażeniowym są dylatacje, skutkujące przecieraniem się izolacji i zvarciami zwojowymi o różnym rozmiarze galwanicznym. Zvarcia zwojowe zachodzą w uzwojeniu magniesnicy i twornika. Należy podkreślić, że lokalne (punktowe) zvarcia zwojowe rozwijają się w zvarcia galwaniczne i w rezultacie w zvarcia doziemne. Następstwem zvarc zwojowych jest zwiększenie lokalne

strat obciążeniowych, deformacja przewodów, utrudnienie przepływu czynników chłodzących, zwiększenie wydzielania ciepła i dalsza eskalacja zwarcia. Poza przyczynami termicznymi przyczyną zwarć zezwojów są również oddziaływania — siły i naprężenia o naturze elektromagnetycznej i mechanicznej (jak siły bezwładnościowe oddziałujące na elementy wirnika). Groźnym przypadkiem defektu jest zwarcie połączeń czołowych uzwojenia wzbudzającego do powierzchni kołpaka wskutek wytarcia izolacji prętów stykających się z kołpakiem. Na zwarcia narażone są również przewody i pręty połączeń czołowych uzwojenia twornika z powodu znacznych przemieszczeń termicznych i wibracyjnych tej części uzwojenia. Dylatacja przewodów uzwojenia wirnika prowadzi do odkształceń przewodów, co przenosi się na odkształcenia klinów i prętów uzwojenia tłumiącego. Przemieszczające się wskutek dylatacji termicznej przewody uzwojenia wzbudzającego oddziałują na kliny i kołpak, powodując efekt niewyważenia wirnika i ekscentryczność jego położenia w szczelinie przytwornikowej.

Wynikiem wskazanych oddziaływań i następujących niesprawności są kolejne stany niesprawnościowe, jak lokalne przegrzania, osłabienie izolacji, wzmożenie drgań, co w przypadku magneśnicy — wirnika jest szczególnie niebezpieczne. Następstwem tych efektów jest asymetria sił elektromagnetycznych i wzmożenie drgań wirnika. Powoduje to również zwiększenie drgań stojana, co skutkuje osłabieniem zawiesznień i zmniejszeniem spójności pakietu rdzenia twornika.

Można stwierdzić, że postępująca degradacja stanu technicznego maszyny następuje w procesie przy dodatnim sprzężeniu skutków z przyczynami, co jest szczególnie niekorzystne.

Drugimi w hierarchii ważności zjawisk oddziałujących na stan techniczny turbogeneratorsa i skutkujących niesprawnościami są efekty mechaniczne objawiające się drganiami. Drgania wirnika są spowodowane oddziaływaniem sił mechanicznych i elektromagnetycznych. Drgania stojana są spowodowane głównie siłami elektromagnetycznymi. Oprócz autonomicznego stanu wibracyjnego tych elementów następuje wzmożenie drgań wskutek różnych niesprawności zachodzących w elementach tych podukładów. Drgania naturalne osłabiają przede wszystkim węzły konstrukcyjne, tzn. łożyska wirnika i zawieszzenia stojana. Drgania uzwojenia stojana oddziałują degradacyjnie na izolację i zamocowania prętów uzwojenia w żłóbkach i w połączeniach czołowych.

3. Ogólny zakres i zasady diagnostyki turbogeneratorów

Podstawowymi parametrami monitorowanymi w trybie on-line magneśnicy i twornika są:

- temperatury uzwojeń i mediów chłodzących, stanowiące miary procesów cieplnych,

- amplitudy (przemieszczeń, prędkości, przyspieszeń) lub wartości szczytowe i widma procesów wibracyjnych podzespołów i elementów konstrukcyjnych, stanowiące miary stanu elastokinetycznego konstrukcji maszyny.

Należy podkreślić, że pomiar temperatury w wybranych miejscach otoczenia uzwojeń i temperatury mediów chłodzących jest kategoryzowany jako warunek konieczny monitoringu maszyny.

W szczegółowej klasyfikacji ważności monitoringu trzeba wskazać prowadzone on-line pomiary drgań łożysk wirnika. Ale dla procesu oceny stanu technicznego ważne, o dużej zawartości informacyjnej, są pomiary drgań żelaza stojana i kadłuba oraz bardzo trudne pod względem technicznym pomiary drgań uzwojenia stojana w strefie połączeń czołowych.

Do kolejnych pomiarów o znaczeniu diagnostycznym można zaliczyć:

- pomiary drgań beczki wirnika,
- pomiary wyładowań niezupełnych w uzwojeniu twornika,
- pomiary magnetyczne zorientowane na wykrywanie niesymetrii pola magnetycznego,
- pomiary napięcia wałowego.

Sygnal napięcia wałowego wydaje się być ważnym symptomem diagnostycznym, choć nie w pełni poznane są jego przyczyny. Sygnal ten jest niewątpliwie symptomem naruszenia sprawności łożysk i wzmożonych efektów wibracyjnych, ale również niesymetrii pola magnetycznego w maszynie spowodowanej różnymi przyczynami. Ważnym problemem pomiaru tego napięcia jest kwestia instrumentacji i sformułowanie cech symptomu.

W przedstawionej klasyfikacji badań diagnostycznych nie wymieniono standardowych pomiarów parametrów i zmiennych stanu turbogenerators, których wyniki są również informacją o stanie maszyny. Są to na ogół te wielkości, które podlegają pomiarom w stanie off-line, a więc są wykonywane w okresie wyłączenia bloku energetycznego z eksploatacji.

Do tych badań zalicza się pomiary rezystancji izolacji, rezystancji uzwojeń, impedancji uzwojeń itp. [6].

Ważne są również pomiary zmiennych stanu turbogenerators dotyczące m.in. stanu zwarcia ustalonego i stanu jałowego. Wyniki tych pomiarów stanowią parametry i sygnały wzorcowe do analizy porównawczej symptomów stanu.

Z przedstawionej skróconej charakterystyki monitoringu turbogenerators wynika dość obszerny zakres lokalizacji oprzyrządowania ustroju maszyny czujnikami pomiarowymi.

Lokalizację czujników stosowanych do detekcji symptomów stanu można wyspecyfikować w następujących podobszarach ustroju konstrukcyjnego maszyny.

Zewnętrzna powierzchnia kadłuba

$$\Omega_k = \{R_{ek}; \varphi < \varphi_1, \dots, \varphi_{12} >; z < z_1, \dots, z_K >\}.$$

Strefa zawieszenia rdzenia stojana

$$\Omega_z = \{R_{es} < r < R_k; \varphi < \varphi_1, \dots, \varphi_{12} >; z < z_1, \dots, z_K >\}.$$

Rdzeń stojana

$$\Omega_s = \{R_{is} < r < R_{es}; \varphi < \varphi_1, \dots, \varphi_{12} >; z < z_1, \dots, z_K >\}.$$

Strefa szczeliny powietrznej przywornikowej

$$\Omega_\delta = \{R_w + (0,7 - 0,9)\delta < r < R_{is}; -\pi/3 < \varphi < +\pi/3\}.$$

Rdzeń wirnika

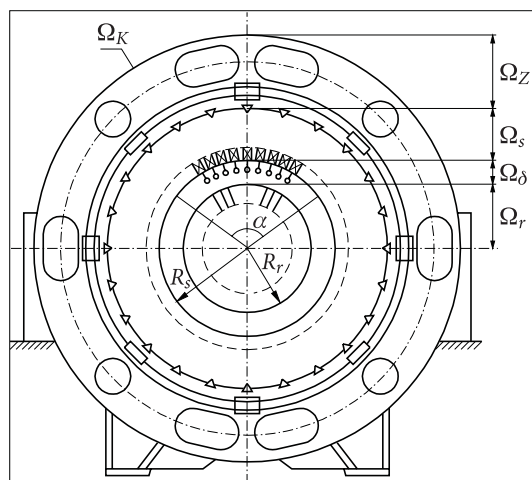
$$\Omega_w = \{R_{iw} < r < R_{ew}; \varphi < \varphi_1, \dots, \varphi_{12} >; z < z_1, \dots, z_K >\}.$$

Strefa wału wirnika

$$\Omega_{ww} = \{0 < r < R_{iw}\}.$$

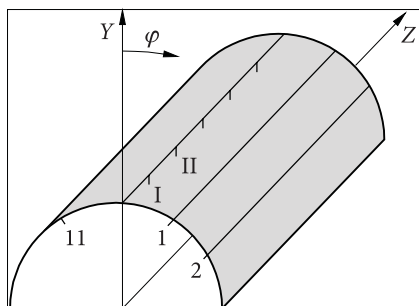
W powyższych relacjach parametrów stref podobszarów podzespołów i elementów turbogeneratora: R_{iw} , R_{ew} , R_{is} , R_{es} oznaczają odpowiednio wewnętrzne i zewnętrzne promienie rdzeni wirnika i stojana (rys. 1).

Ważne jest również ujednoznaczenie lokalizacji czujników. W związku z tym należy sparametryzować ustrój w wymiarze obwodowym i wzdłuż maszyny. Tak więc



Rys. 1. Oznaczenia podobszarów podzespołów i elementów konstrukcyjnych turbogeneratora

wprowadza się współrzędną tangencjalną φ_n numerowaną w konwencji godzinowej i współrzędną aksjalną z_k numerowaną wzdłuż osi maszyny (rys. 2).



Rys. 2. Szkic parametryzacji konstrukcji maszyny

Ważnym podobszarem instalacji czujników pomiarowych, zastosowanych przede wszystkim do monitoringu rozkładu pola magnetycznego i wyładowań niezupełnych w uzwojeniach stojana, jest wskazany podobszar szczeliny przywornikowej Ω_δ . Wymaga to jednak specjalnego doboru czujników i zainstalowania odpowiednich statywów. We wskazanym obszarze szczeliny można również zainstalować kamery termowizyjne i obiektywy laserowego pomiaru drgań wirnika i wału.

Należy podkreślić, że bardzo ważnym zagadnieniem w oprzyrządowaniu wewnętrznym turbogeneratorsa jest zabezpieczenie przetworników pomiarowych, osprzętu i przewodów przed spowodowaniem defektu w badanej maszynie.

Liczba czujników pomiarowych, jak ustala się to w planie eksperymentu, powinna uwzględniać zupełność i niezależność informacji pomiarowej, możliwości interfejsu sygnałów w transmisji do jednostki centralnej (co odbywa się przez przepust pomiarowy w kadłubie turbogeneratorsa) i kwestię ekonomiczności badań.

4. Sygnały diagnostyczne i charakterystyki porównań diagnostycznych

Za podstawowy sygnał diagnostyczny stanu turbogeneratorsa należy uznać temperaturę poszczególnych jego elementów (podzespołów). Jest to sygnał jednowymiarowy parametrycznie, ale wielowymiarowy w sensie przestrzenno-czasowym. Temperatura, jako symptom stanu, powinna być wyznaczana w punktach uzwojeń maszyny i w mediach chłodzących, ale również w wybranych punktach rdzeni. Wymiar symptomu temperaturowego można zwiększyć, wyznaczając pochodną tej wielkości. Należy zauważyć, że ze względu na złożoną przestrzenną strukturę uzwojeń lokalizacja czujników pomiarowych tego sygnału jest zagadnieniem bardzo złożonym. Szczególnie utrudnione jest monitorowanie temperatury wirnika.

Jako przebieg wzorowy temperatury można przyjąć charakterystyki czasowego przebiegu procesu nagrzewania w wybranych punktach nowo zainstalowanego generatora lub wartości temperatury w wybranych punktach w stanie cieplnie ustalonym przy określonym obciążeniu maszyny. Ważny jest również monitoring temperatury łożysk. Wyniki pomiarów temperatury podczas eksploatacji powinny być odnotowywane oprócz czasu bieżącego t również czasem globalnym eksploatacji τ (czas eksploatacji bloku energetycznego). Można więc postulować pierwszoplanowo rejestrację sygnałów temperaturowych jako funkcję położenia czujnika i zmiennej czasu przy parametrycznie ustalonym stanie obciążenia p_m , obejmującym moc czynną, napięcie na zaciskach, prąd twornika i wzbudzenia oraz współczynnik mocy:

$$\vartheta(\xi_k, t, \tau); \perp p_m = \text{const.}$$

Poza wartościami parametru tego symptomu drugim wymiarem może być pochodna względem czasu lokalnego $\partial\vartheta/\partial t$ i czasu globalnego $\partial\vartheta/\partial\tau$, wyznaczająca trendy zmian temperatury, co jest przydatne do oceny stopnia intensywności rozwoju usterki. Tak więc temperaturę można uznać za podstawową miarę stanu technicznego maszyny.

Drugą grupą sygnałów symptomalnych objętych monitoringiem, równorzędnych z temperaturą, są sygnały wibracji wirnika i stojana:

$$\begin{aligned} d_{\xi}(\xi_k, t, \tau); \\ v_{\xi}(\xi_k, t, \tau); \\ \perp p_m = \text{const}, m = 1, 2, 3, \dots \\ a_{\xi}(\xi_k, t, \tau); \\ W(\omega_n, t, \tau), \end{aligned}$$

gdzie: d oznacza przemieszczenie drgań;

v — prędkość;

a — przyspieszenie (wyznaczane dla składowej radialnej i tangencjalnej);

$W(\omega)$ — widmo częstotliwości;

$\xi_k - k = 1, 2, 3$ — współrzędne układu parametryzującego ustrój magneśnicy;

t — czas bieżący diagnozowania;

τ — czas eksploatacji turbogeneratora;

p_m — ustalone parametry stanu w procedurach diagnostycznych.

Wskazane wielkości drgań (amplitudy d , v , a i widma W) stanowią o wielowymiarowości tego symptomu, co jest bardzo cenne w odniesieniu do lokalizacji usterek i ich przyczyn oraz stopnia rozwoju.

Drgania wirnika — magniesnicy można badać na łożyskach, ale również wskazany jest pomiar drgań wału metodą bezkontaktową od strony turbiny i wzbudnicy.

Drgania stojana należy kontrolować przede wszystkim w punktach zawieszzeń rdzenia i w strefie połączeń czołowych.

Bardzo ważnym elementem oceny diagnostycznej turbogenerators jest pomiar drgań wirnika (łożysk i wału) podczas wybiegu. Analiza synchroniczna sygnału drganiowego przy przejściach prędkości obrotowej przez punkty obrotów odpowiadających wartościom częstotliwości rezonansowych ma dużą wartość diagnostyczną. Interesujące są również wyniki pomiarów w stanie jałowym w funkcji prądu wzbudzenia.

Wielkościami parametryzującymi stan drganiowy turbogenerators są zmienne stanu eksploatacyjnego. Do podstawowych zmiennych charakteryzujących stan obciążenia *tbg* zalicza się: U — napięcie na zaciskach, I — prąd twornika, I_f — 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 $\cos\varphi$ specyfikujący charakter obciążenia *tbg* mocą bierną oraz kąt obciążenia turbogenerators.

Kolejnym sygnałem diagnostycznym jest wielkość magnetyczna, np. w reprezentacji indukcji magnetycznej, zorientowana do oceny równomierności i symetrii rozkładu głównego strumienia magnetycznego:

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

Istotne są dwie składowe indukcji: B_r — radialna i B_{φ} — tangencjalna.

Indukcja magnetyczna jest wielkością fizyczną o bardzo złożonym rozkładzie w obwodzie magnetycznym maszyny i nie jest łatwa w detekcji. Największy stopień informatywności sygnał ten zawiera z obszaru szczeliny przywirnikowej, ale umieszczenie tam czujników nie jest konstrukcyjnie proste. Można jednak umieścić czujniki na specjalnych wysięgnikach w górnej strefie szczeliny. Położenie czujników na obwodzie szczeliny powinno być sparametryzowane względem podzielności podziałki biegunowej. Zmiana rozkładu pola w maszynie (w obszarze szczeliny powietrznej) jest spowodowana przede wszystkim zwarciami zwojów cewek uzwojenia wzbudzającego i zezwojów uzwojenia twornika. Również ekscentryczność szczeliny (wskutek statycznego i dynamicznego przesunięcia osi wirnika względem osi wytoczenia stojana) ujawnia się w sygnale indukcji szczelinowej.

Wnikliwa analiza wyładowań niezupełnych wymaga również zainstalowania wewnątrz *tbg* odpowiednich czujników — anten do detekcji tego sygnału. Najprościej jest umieścić pętle pomiarowe na przewodach fazowych. Jednak sygnał nie będzie dość jednoznaczny. Można wzorem sond indukcji szczelinowej zainstalować sondy wyładowań niezupełnych w strefie szczeliny powietrznej. Ważne jest w tym

przypadku zabezpieczenie czujników przed zakłóceniami. Nadrzędny problem to zabezpieczenie wszystkich czujników (sensorów) przed utratą zamocowania i naruszeniem ustroju konstrukcyjnego maszyny.

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 zmiennymi i parametrami eksploatacyjnymi.

5. Charakterystyki i sygnały wzorcowe oraz miary diagnostyczne

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

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

- nagrzewania, czyli przebiegu temperatury w funkcji czasu w ustalonych punktach lub strefach magniesnicy i ustalonych warunkach stanu eksploatacyjnego określonego mocą czynną, prądem twornika i współczynnikiem mocy

$$\vartheta = f(t) \perp [P, I, \cos \varphi] = \text{const},$$

lub przebieg temperatury w stanie bezobciążeniowym przy ustalonym prądzie wzbudzenia. Wykres ten stanowiłyby charakterystyki wzorcowe;

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

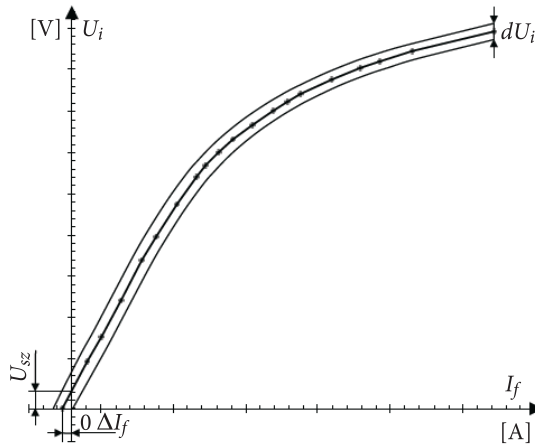
$$U_{ijk} = f(I_f) \perp n_k = \text{const},$$

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

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

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

Wskazane charakterystyki wyznaczone dla nowo wyprodukowanego turbogeneratora stanowią charakterystyki wzorcowe — $U_{ijk}^{(w)}, I_{zK}^{(w)}$.



Rys. 3. Wzorcowa charakterystyka stanu jałowego z oznaczonymi dopuszczalnymi przedziałami niezgodności wartości symptomu

Miarą porównawczą i kryterium oceny są różnice między charakterystykami wzorcowymi i wyznaczonymi po ustalonym okresie eksploatacji związanym z przeglądem i/lub remontem bloku energetycznego.

$$d_s U_i = \left| U_{ijK}^{(w)} - U_{ijK} \right|, \perp I_f, n_k \quad (1)$$

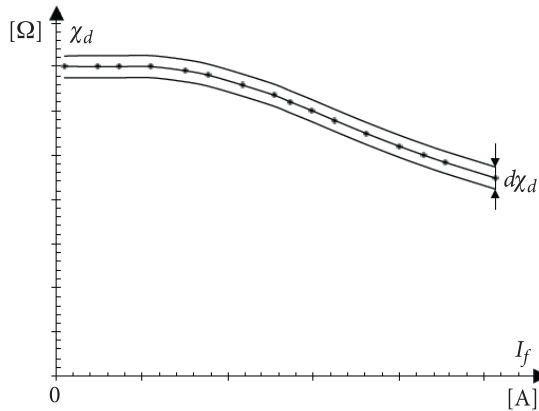
$$d_s I_z = \left| I_{zK}^{(w)} - I_{zK} \right|, \perp I_f, n. \quad (2)$$

Różnica ta jest parametrem symptomalnym. To znaczy przekroczenie tej miary względem wartości usankcjonowanej normami należałoby 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

$$d_s I_f = \left| I_{f\varphi}^{(w)} - I_{f\varphi} \right|, \perp U_N, I_N, \cos \varphi_{ind}, \cos \varphi_{poj}. \quad (3)$$

Mogą to być również miary porównawcze parametrów obwodowych maszyny, np. reaktancji, które są określone związkami strumieniowo-prądowymi. Przykładem takim jest reaktancja synchroniczna podłużna tb_g .



Rys. 4. Wzorcowa charakterystyka reaktancji synchronicznej z oznaczonymi dopuszczalnymi przedziałami niezgodności wartości symptomu

Na podstawie eksperymentalnego materiału diagnostycznego i materiału z przeglądów oraz remontów *tbg* można określić wartości kryterialne — $\varepsilon d\chi_K$ do oceny sprawności i zdatności^{*)} maszyny w sytuacji przekroczenia tych kryteriów

$$\varepsilon d\chi_K > d_s\chi_K$$

gdzie $\chi_K \leftrightarrow U_{if}, I_z, I_f$ oznacza dowolną zmienną stanu.

Dla wzorcowych charakterystyk aspektu mechanicznego badań diagnostycznych można ustalić pomiary wibracyjne magnesu 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.

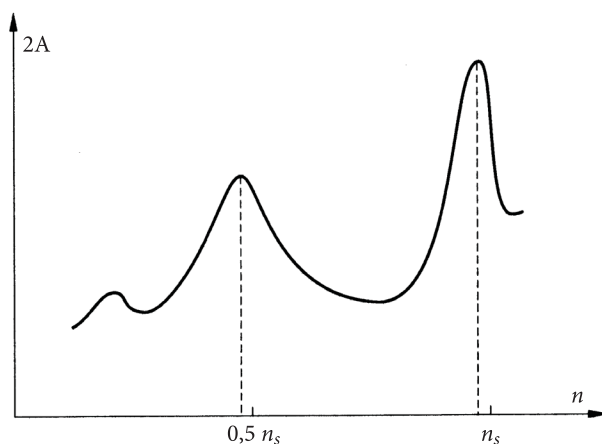
$$\{a_{\xi}; v_{\xi}, d_{\xi}\} = f(\xi_k, n, \tau); \perp I_{f_m} = \text{const}, m = 1, 2, 3, \dots$$

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

^{*)} Przez niesprawność maszyny (stan niesprawnościowy) rozumie się przekroczenie wartości granicznej przez miarę co najmniej jednego symptomu sygnału **drugorzędowego**, charakteryzującego proces fizyczny zachodzący w maszynie. Przez stan niezdatności maszyny rozumie się przekroczenie wartości granicznej przez miarę co najmniej jednego symptomu sygnału **zasadniczego** charakteryzującego proces fizyczny zachodzący w maszynie.

dylatacjami elementów konstrukcyjnych magnesy (klinów żłbkowych, prętów uzwojenia tłumiącego, prętów uzwojenia wzbudzającego). Na poziom wibracji w stanie wybiegu silny wpływ ma ekscentryczność szczeliny przywironkowej, co można zidentyfikować tymi pomiarami przy różnych prądach wzbudzenia.



Rys. 5. Przykładowy wzorcowy przebieg amplitud przemieszczeń drgań łożyska w funkcji prędkości obrotowej podczas wybiegu wirnika turbogenerators

Charakterystyki te są również podstawą do sformułowania matematycznego modelu diagnostycznego z ustalonym poziomem residuów — różnicy sygnału eksperymentalnego i teoretycznego. Dlatego wibracyjne charakterystyki w stanie wybiegu powinny być zamieszczone w katalogu podstawowych charakterystyk turbogenerators 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 ($\chi_{z1; z2}$) i przebiegi zmienne w czasie $S \chi(t)$. Tak więc analogicznie do wyrażen (1, 2, 3) miarą oceny symptomu jest różnica, czyli odległość charakterystyk (lub sygnałów).

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

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

$$d_s^d S_k \chi = \left| S_k^{d(w)} \chi - S_k^d \chi \right|, \perp p_N = \text{const.} \quad (5)$$

W analizie wyznaczonych charakterystyk symptomalnych znaczenie mają również zmienności parametryczne, a więc także badanie odległości rodzin charakterystyk

$$d_s S_{kP_n} \chi = \left| S_{kP_n}^{(w)} \chi - S_{kP_n} \chi \right|. \quad (6)$$

Znacznie obszerniejszemu zbiorowi 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 najważniejsze są wartości szczytowe, średnie, skuteczne oraz ich widma częstotliwościowe i wielkości bezwymiarowe — dyskryminanty, jak współczynniki kształtu, harmoniczności itp., duże znaczenie mają wielkości utworzone w wyniku działań operatorowych na sygnałach.

Do podstawowych, poza zwykłymi operacjami całkowania 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.

Łączenie w miarach symptomów sygnałów o różnej naturze fizycznej daje możliwość wykrywania niesprawności w sposób pośredni, tzn. również za pośrednictwem sygnałów niebezpośrednio związanych ze zjawiskiem degradacji ustroju maszyny [7].

Na szczególne wyróżnienie zasługują operacje splotu i to nie tylko do oceny sygnałów losowych za pośrednictwem funkcji korelacji. Właśnie operacja splotu sygnałów z ich wzorcami (autokorelacja) lub z sygnałami danego procesu diagnostycznego, ale uznanego za sygnał 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 sygnału $S(t)$

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

$S_w(t)$ — jest sygnałem wzorcowym.

Jak zaznaczono, natura fizyczna 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 twornika lub/i sygnał drganiowy monoharmoniczny itp.

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 (11) sparametryzowane czasem eksploatacji generatora, które stanowić będą normę stanu technicznego dogodną do oceny stanu bieżącego i prognozy dalszej eksploatacji w sytuacji przekroczenia niektórych wartości kryterialnych.

$$N_n S_k(\tau) = [N_{11}(S_1, \tau), N_{12}(S_2, \tau), \dots, N_{1k}(S_k, \tau), \dots, N_{nm}(S_n, \tau), \\ N_{NN-1}(S_{N-1}, \tau), \dots, N_{N1}(S_1, \tau)], \quad n = 1, \dots, N. \quad (11)$$

Należy zauważyć, że elementy wskazanego multiwektora o jednakowych wskaźnikach $N_{nn}(S_n, \tau)$ są również zbiorem uporządkowanym stanowiącym subwektory obejmujące 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 — magnésnice tych maszyn. Pewien stopień

oprzyrządowania turbogeneratorsa, co do rodzaju czujników diagnostycznych oraz liczby i miejsc ich instalacji, powinien być na etapie jego produkcji usankcjonowanym wymogiem.

Oprócz jednak strony technicznej pomiarów i oprzyrządowania powinna być zastosowana odpowiednia metodyka pomiarów i specyfikacja cech symptomów stanu maszyny. Opracowanie cech sygnałów powinno zmierzać do ich ujednoznacznienia, wyznaczania symptomów niezależnych, co zwiększa zbiór informacji, i tworzenia zbioru pełnego parametrów symptomów stanu.

Powiększenie liczby miar sygnałów symptomalnych, a w szczególności porównań, według różnych miar metrycznych, do sygnałów wzorcowych tej samej natury, ale również o innej naturze fizycznej, zwiększy stopień ujednoznacznienia, czułości i informatywności wyznaczonych symptomów.

Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na IX Krajowej Konferencji „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów – DIAG’2015”, Ustroń 22-25. 09. 2015.

Artykuł wpłynął do redakcji 10.07.2015 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 7.10.2015 r.

LITERATURA

- [1] BIELA J., MACEK-KAMIŃSKA K., *Badania diagnostyczne wirników generatorów synchronicznych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, 62, 2008.
- [2] CEMPEL Cz., TOMASZEWSKI F. (red.), *Diagnostyka maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań*, MCNEMT, Radom, 1992.
- [3] CHOLEWA W., MOCZULSKI W., *Diagnostyka techniczna maszyn. Pomiar i analiza sygnałów*, Skrypt Politechniki Śląskiej, nr 1758, Gliwice, 1993.
- [4] COLAK I., GARIP I., SAGIROGLU S., BAYHAN S., *Remote monitoring of the load characteristics of synchronous generators*, 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 11-13 May 2011, pp. 1-4.
- [5] GLEBOW I.A., DANILEWICZ J.B., *Diagnostika turbogeneratorow*, Nauka, Leningrad, 1989.
- [6] GLINKA T., *Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle*, Katowice, 1999.
- [7] PRZYBOROWSKI W., *Uwagi o metodzie diagnostyki subpośredniej zespołów napędowych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wrocławska, 49, Studia i Materiały, 21, 2000.
- [8] PRZYBYSZ J., *Turbogeneratory. Diagnostyka i eksploatacja*, WNT, Warszawa, 1987.
- [9] PRZYBYSZ J., *Turbogeneratory. Zagadnienia eksploatacyjne*, Wyd. Instytutu Energetyki, Warszawa, 2004.
- [10] VRAZIC M., MALJKOVIC Z., KOVACIC M., HANIC Z., *Synchronous generator monitoring system as a tool for power grid diagnostics*, Cigré SC A1 Colloquium on Large Electrical Machines and Renewable Generation, Bucharest, Romania, 3-4 September, 2013.

W. PRZYBOROWSKI

Technical and methodological recommendations for turbogenerators diagnostics

Abstract. The paper presents the elements of the principles of diagnosing the technical condition of turbogenerators. The problem was examined in terms of methodology based on the types of sensors and their distribution structure and principles of analysis of symptoms of the technical condition of machines. We postulate to increase the diagnostic instrumentation of the turbogenerator and to determine the basic characteristics and measurement of diagnostic signals. The work also discusses the basic patterns of diagnostic signals and proposes general dependencies of transformation and evaluation of these signals. The aim of this approach is to increase the unambiguity, sensitivity, informativity and multidimensionality of the condition symptoms.

Keywords: diagnostic, turbogenerator, monitoring, symptoms, sensors

DOI: 10.5604/12345865.1186226

