



Mgr inż. Jerzy Dobosiewicz

Pro Novum — Katowice

UKD 621.313.52:620.179.1

Badania nieniszczące wałów wirników generatorów

Wał wirnika generatora — charakteryzujący się skomplikowanymi kształtami i dużą masą — przenosi podczas eksploatacji naprężenia stałe i zmienne. Naprężenia te mogą spowodować naruszenie całości materiału, które w najlepszym przypadku może uczynić wał niezdatnym do dalszego użytkowania, a w najgorszym — doprowadzić do zniszczenia całego turbozespołu. Nagłe zerwanie wału generatora zdarza się rzadko. Najczęściej uszkodzenia rozwijają się stopniowo, toteż można je wykryć kontrolując w sposób ciągły stan dynamiczny wirnika oraz wykonując okresowo odpowiednie badania i przeglądy.

Zakres, miejsca i metody badań zależą od czasu pracy i liczby uruchomień wirnika oraz własności mechanicznych stali użytej do wyrobu wirnika.

Warunki pracy wału wirnika

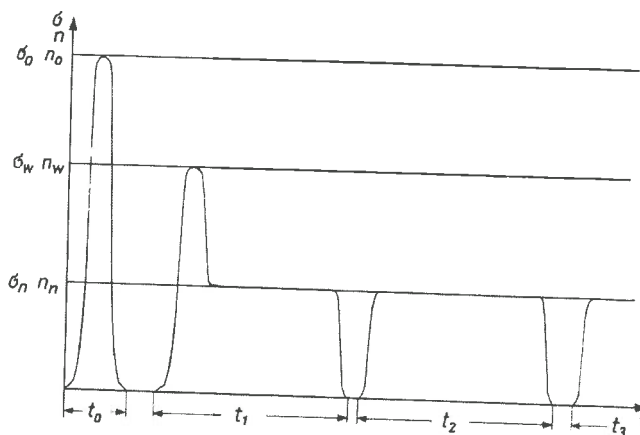
Do budowy wałów wirników generatorów używa się niskostopowych stali ferrytyczno-perlitycznych, najczęściej typu CrNiMo w stanie ulepszonym cieplnie. Podczas eksploatacji w materiale wirnika nie zachodzą zmiany strukturalne, z uwagi na niską temperaturę pracy. Ale po wieloletniej pracy wału, wskutek działania naprężeń stałych i zmiennych mogą powstać pęknięcia zainicjowane na koncentracjach naprężeń (technologicznych lub konstrukcyjnych). W przeważającej części wału dominują naprężenia kinetostatyczne wywołane działaniem siły odśrodkowej. Pozostałe naprężenia — od ciężaru, sił elektromagnetycznych, momentu obrotowego itp. — są małe i można je w obliczeniach pominąć. Ponieważ podczas uruchamiania generatora naprężenia wraz z prędkością obrotową narastają do wartości maksymalnych, w przypadku częstszych uruchomień można zatem mówić o pracy wału w warunkach zmęczenia małowyciskowego (rys. 1).

Każdemu uruchomieniu towarzyszy wzrost naprężeń kinetostatycznych, czyli każde uruchomienie można traktować jako pulsację naprężenia. Najmniejsze zmiany naprężenia oczywiście odpowiadają normalnym uruchomieniom (σ_n) bez próby wytrząsków (σ_w). Największa zmiana naprężenia σ_o występuje podczas odwirowywania nowego wirnika; jest to próba jednorazowa. Dlatego przy obliczeniu ich stopnia wyczerpania nie uwzględnia się naprężenia maksymalnego σ_o , lecz naprężenia w stanie ustalonym i dla próby wytrząsków oraz liczbę uruchomień i liczbę prób wytrząsków.

Naprężenia zmienne zależą od sposobu eksploatacji i mają charakter odzerowo-tętniący-pulsacyjny. Naprężenia zmienne charakteryzuje współczynnik asymetrii $R = \sigma_{\min.} / \sigma_{\max.}$ i naprężenie średnie $\sigma_m = (\sigma_{\max.} + \sigma_{\min.}) / 2$. Dla pulsacji $\sigma_{\min.} = 0$ i równieź współczynnik asymetrii $R = 0$.

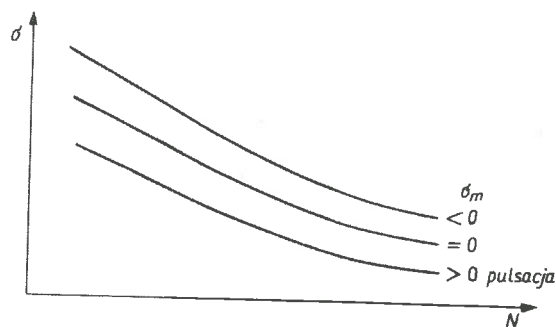
Wytrzymałość zmęczeniowa wału wirnika zależy od:

- charakteru naprężenia (rys. 2); element pracujący w warunkach naprężenia pulsacyjnego ma najmniejszą odporność na zmęczenie;



Rys. 1. Warunki pracy wału wirnika

n_n — znamionowa prędkość obrotowa (3000 obr./min)
 n_w — próbna prędkość obrotowa — sprawdzenie wytrząsków (3300 obr./min),
 n_o — prędkość obrotowa odwirowywania wirnika nowego (3600 obr./min)



Rys. 2. Krzywe wytrzymałości stali na zmęczenie
 σ — naprężenie, σ_m — naprężenie średnie, N — liczba cykli do uszkodzenia

- warunków eksploatacji, temperatury, środowiska; ze wzrostem temperatury obniża się odporność stali na zmęczenie; podobnie wpływa obecność środowiska agresywnego;
- składu chemicznego i stanu materiału (obróbka cieplna); stale o wysokiej granicy plastyczności są z reguły mało odporne na zmęczenie, zwłaszcza małowyciskowe;
- kształtu geometrycznego; liczne, nagłe zmiany kształtu (wpusty, otwory, wady technologiczne) stają się koncentratorami naprężenia i mogą być inicjatorami pęknięć.

Należy zwrócić uwagę na to, że siły odśrodkowe i powstające od nich naprężenia są proporcjonalne do kwadratu prędkości obrotowej. Jeżeli robocza prędkość obrotowa wynosi 3000 obr./min, to mechaniczne obliczenia wytrzymałości wału wykonuje się dla prędkości o 30% większej, tj. równej 3900 obr./min. Z taką prędkością wirnik obraca się rzadko, właściwie tylko podczas badań prototypowych wykonywanych na specjalnych stanowiskach u dostawcy. Przekroczenie tej prędkości w eksploatacji jest zwykle jednoznaczne z uszkodzeniem wirnika.

Wał generatora przenosi również naprężenia od zginania spowodowanego ciężarem własnym oraz naprężenia od momentu skręcającego. Wartości tych naprężeń nie są duże, ale należy pamiętać, że naprężenia te mają charakter naprzemienny. Naprężenia zginające rosną znacznie w czasie przechodzenia przez krytyczną prędkość obrotową, zwłaszcza jeżeli wirnik jest nieodpowiednio wyważony lub ekscentryczny.

Naprężenia zginające sumują się z naprężeniami skręcającymi, które podczas normalnej eksploatacji w najmniejszym przekroju wirnika rzadko przekraczają 30 MPa. Naprężenia od skręcania wzrastają jednak istotnie podczas zwarcia generatora. Można przypuszczać, że naprężenia te wzrastają z taką samą szybkością jak prąd zwarcia. Zakłada się, że przy zwarciu na zaciskach maszyny moment na wale generatora od strony turbiny zwiększa się — w stosunku do normalnego — dziesięciokrotnie.

Przy założeniu, że momenty bezwładności wirników turbiny i generatora są w przybliżeniu równe, w warunkach zwarcia:

$$M_z = \frac{M_z - M_n}{2} + M_n = 5,5M_n,$$

M_n — moment podczas normalnej pracy, M_z — $10 \cdot M_n$ — moment w czasie zwarcia.

Moment ten działa na czopie wału od strony turbiny i powoduje pięciokrotny wzrost naprężeń. Wobec nagłego, udarowego charakteru mogą one w razie zmniejszonej plastyczności wału spowodować powstanie mikronieciągłości w materiale.

Podczas przechodzenia wirnika przez krytyczną prędkość obrotową amplituda drgań zginających znacznie wzrasta. Wielu autorów przypuszcza, że w tym czasie dynamiczne naprężenia od zginania wzrastają 5- lub 6-krotnie (w idealnie wyważonym wirniku), w porównaniu z naprężeniami przy statycznym ugięciu. Może to mieć istotny wpływ na rozwijanie się uszkodzeń w tych miejscach, w których zostanie przekroczona granica plastyczności materiału, tj. w okolicy karbów konstrukcyjnych lub strukturalnych.

Istotnymi elementami konstrukcji, ujemnie wpływającymi na warunki pracy wału, są karby konstrukcyjne. Powodują one wzrost współczynnika koncentracji naprężeń, który zwiększa

naprężenia miejscowe (zwłaszcza zginające), co w połączeniu ze wzrostem bezwzględnych wartości tych naprężeń (podczas przechodzenia przez krytyczne prędkości obrotowe) prowadzi do zjawisk bardzo niepożądanych.

Współczynnik koncentracji — jak wiadomo — zależy od charakteru odkształcenia (rozciąganie, ściskanie), granicy plastyczności i pewnych wymiarów geometrycznych. I tak, np.:

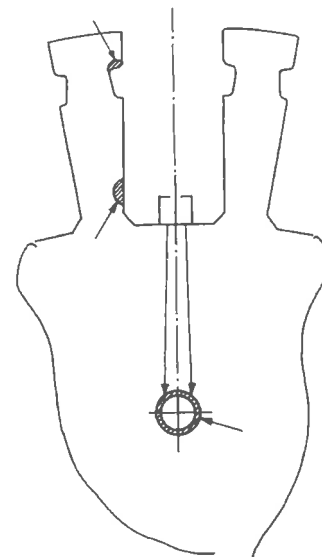
- tuleja założona skurczowo na wał (pierścień centrujący) daje współczynnik koncentracji $\beta_k = 2,8 - 3,2$;
- kołpak nałożony na powierzchnię osadczą w okolicy dużych zębów, wskutek przemieszczenia się daje współczynnik koncentracji $\beta_k = 3,8 - 5,0$;
- wytoczenie obwodowe, w zależności od stosunku średnicy wytoczenia do średnicy pierwotnej daje współczynnik koncentracji $\beta_k = 2,5 - 3,0$, a w kanałach mających na celu uelastycznienie beczki — do 8,0;
- gwintowany otwór w wale, wywiercony w kierunku promieniowym daje współczynnik koncentracji $\beta_k = 5,0 - 6,0$;
- zmiana średnicy (stopniowanie wału) w zależności od stosunku średnic daje $\beta_k = 1,5 - 4,0$.

Warto zwrócić uwagę, że ze wzrostem granicy plastyczności stali (ulepszone cieplnie stale stopowe) współczynnik koncentracji znacznie wzrasta.

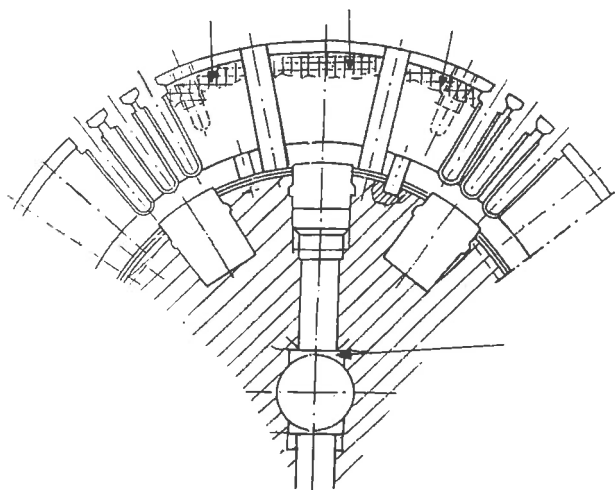
Okresowe przeglądy i badania

Okresowe przeglądy i badania eksploatowanych wałów oprócz zapobiegania totalnym awariom mają na celu rozpoznanie przyczyn uszkodzeń i umożliwienie podjęcia środków zaradczych. Obszary podlegające przeglądom i badaniom powinny objąć miejsca, w których podczas pracy występują maksymalne naprężenia lub jego koncentracja; są to:

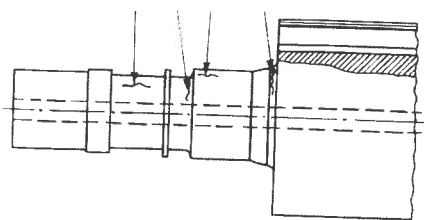
- otwór centralny (rys. 3),
- rowki obwodowe na beczce,
- żłobki podłużne (rys. 3),
- osadzenie kołpaków pierścieni mocujących (rys. 4),
- przejścia zmiany średnic (rys. 5),



Rys. 3. Miejsca występowania pęknięć w żłobkach i na otworze centralnym oraz sposób badania ultradźwiękowego objętości metalu w okolicy otworu centralnego



Rys. 4. Miejsca występowania pęknięć na dużych zębach pod osadzeniem kołpaków oraz na różnego rodzaju otworach



Rys. 5. Miejsca występowania pęknięć na nagłych zmianach średnic oraz na powierzchniach czopów łożyskowych i uszczelnieniach

- wpusty, otwory przewodowe, otwory gwintowane (rys. 4),
- miejsca współpracy elementów wirujących z nieruchomymi (czopy, uszczelnianie itp. — rys. 5).

Badania otworu centralnego

Należy je wykonywać po 100000—150000 h pracy lub po przekroczeniu 500 uruchomień. Badanie musi odpowiadać aktualnej wiedzy technicznej i ma za zadanie:

- stwierdzenie pęknięć spowodowanych pracą urządzeń,
- znalezienie wad, które nie mogły być stwierdzone w czasie produkcji z powodu ówczesnego poziomu wiedzy i obowiązujących wtedy norm badawczych.

Do badania otwór powinien być odpowiednio przygotowany, najlepiej przez honowanie. Badania wykonuje się metodą kompleksową, która polega na:

- przeglądzie całej powierzchni otworu przy użyciu endoskopu,
- sprawdzeniu powierzchni otworu na obecność pęknięć metodami defektoskopii barwnej lub prądami wirowymi,
- sprawdzeniu objętości metalu przynajmniej w rejonie otworu centralnego metodą ultradźwiękową „borosonic” lub przy wywołanym wirniku (poprzez dna rowków uzwojeniowych) czujnikami emitującymi fale podłużne i poprzeczne; jest to metoda tańsza od metody „borosonic”; ocenę wielkości wad należy wykonać metodą „OWR”.

Wszelkie pęknięcia wykryte na powierzchni otworu powinny być usunięte przez wytoczenie. Wymiary wad technologicznych mogące pozostać bez usuwania ustala się na pod-

stawie dokonanych dla danego wału obliczeń (mechanika pęknięcia kruchego). W przypadku usuwania wad lub pęknięć zwiększona średnica otworu centralnego w miejscu wytoczenia d' powinna spełniać warunek $d' \leq 1,4d$ (d — pierwotna średnica otworu).

Badania rowków obwodowych

Rowki obwodowe znajdujące się na beczce powinny być przeglądane po każdym wyjęciu wirnika i po oczyszczeniu papierem ściernym poddane badaniom za pomocą defektoskopii barwnej. W celu łatwiejszego wykrycia pęknięć obwodowych z reguły rozpoczynających się na dnie rowka wirnik należy ustawić na kozłach tak, aby płaszczyzna dużych zębów znalazła się w położeniu pionowym. Miejsca podejrzane należy oglądać i badać od dołu. Następnie wirnik należy obracać o 90° i powtarzać operację. Wykryte pęknięcia należy usunąć przez przetoczenie wirnika. W tym celu niestety należy usunąć z niego uzwojenie. Głębokość przetoczenia nie powinna przekraczać ok. 3% średnicy beczki wirnika. Podczas przetoczenia rowek należy poszerzyć w taki sposób, aby dno rowka można było zaokrąglić promieniem $r = 10$ mm.

Badania żłobków podłużnych

Należy je wykonać w czasie przezwajania wirnika. Pęknięcia występują z reguły na dnie żłobka w miejscu przejścia zębów w wał oraz w górnej części zębów we wrębie służącym do mocowania klinów. Badanie wykonuje się metodą defektoskopii barwnej, ze względu jednak na trudny dostęp i głębokość rowka oględziny należy wykonać za pomocą endoskopu. W zasadzie niedopuszcza się obecności pęknięć na zębach. O przydatności do eksploatacji tak uszkodzonego wirnika powinien wypowiedzieć się dostawca.

Osadzenia kołpaków pierścieni centrujących

Miejsca osadzeń powinny być badane po każdym 100000 h pracy wirnika. Do badań należy zdjąć kołpaki. Pęknięcia występują w miejscu osadzenia kołpaków na beczce w rejonie dużych zębów. Mają one charakter obwodowy i niekiedy są bardzo głębokie, tj. sięgają kilkadziesiąt milimetrów. Pęknięcia widać już w czasie oględzin wirnika. W celu dokładniejszej oceny wymiarów pęknięć należy wykonać badania penetrajne; podobnie w miejscu osadzenia pierścienia centrującego. W przypadku wykrycia pęknięć wirnik można dopuścić do dalszej eksploatacji pod warunkiem usunięcia przyczyny uszkodzenia, powiększenia osadzenia przez przetoczenie i przesunięcia kołpaka w kierunku beczki oraz przetoczenia osadzenia pierścienia centrującego.

Badanie przejścia zmiany średnic

W przejściach z jednej średnicy wału w drugą występują pęknięcia obwodowe po ok. 100000 h pracy. Najczęściej pęknięcia te umiejscawiają się w przejściu beczki w wał. Po zdjęciu kołpaka i dokonaniu oględzin miejsca występowania

pęknięć podaje się badaniom magnetycznym. W przypadku wykrycia pęknięć zaleca się ich usuwanie przez przetoczenie. Dopuszczalna głębokość przetoczenia nie powinna przekraczać głębokości równej 2% średnicy wału w tym miejscu.

Badania wpustów otworów przewodowych i gwintowanych

Poddaje się je przeglądom po zdjęciu kołpaków, wentylatorów i wyjęciu przewodów. W miejscach tych pęknięcia występują na krawędziach i dnach otworów. Badania polegają na zastosowaniu metody defektoskopii barwnej i obserwacji za pomocą endoskopu. Wykryte pęknięcia usuwa się przez rozwiercanie otworów. Dopuszczalne powiększenia rozwiercanej średnicy są zazwyczaj bardzo duże, zależą jednak od jej wymiarów początkowych. Na przykład otwory o średnicy rzędu 100 mm mogą być powiększone o ok. 10% na stronę; mniejsze średnice otworów można powiększyć jeszcze bardziej.

Badania czopów łożyskowych i miejsc pod uszczelnieniami

Podczas każdego remontu turbosespołu związanego z wyjęciem wirnika generatora należy dokonać przeglądu czopów i miejsc współpracujących z uszczelnieniami. W miejscach tych bardzo często występują pęknięcia obwodowe lub promieniowe, zwłaszcza na czopach utwardzonych przez zgniot (śrutowanie, rolkowanie itp.). Po oględzinach miejsca te należy poddać badaniom przy użyciu defektoskopii barwnej lub fluorescencyjnej. Wykryte pęknięcia można usunąć przez przeszlifowanie lub w przypadku większej głębokości — przez przetoczenie. Dopuszczalne zmniejszenie średnicy po przetoczeniu nie powinno przekraczać 1–2 mm na stronę. W przypadku większych głębokości należy zasięgnąć opinii dostawcy.

Należy pamiętać, że ze względu na kształt i konstrukcję badanie wirnika jest operacją bardzo trudną i powinno być wykonywane przez ekipę o dużym doświadczeniu. Wirnika, w którym wykryto pęknięcia nie wolno dopuszczać do dalszej eksploatacji. O ewentualnej naprawie i dalszej przydatności wału do pracy decydować może tylko zespół specjalistów, w skład którego powinni wejść: technolog, konstruktor, użytkownik oraz specjaliści z dziedziny badań nieniszczących i inżynierii materiałowej.

Z każdego badania należy sporządzać protokół, który powinien być przechowywany u użytkownika.

Należy podkreślić, że badania profilaktyczne dają pozytywne wyniki tylko wtedy, gdy są wykonywane systematycznie i — oczywiście — odpowiednio opracowanymi i sprawdzonymi metodami. Każdy nowy rodzaj badania powinien być opracowywany na podstawie głębokiej analizy zaistniałego lub mogącego wystąpić uszkodzenia.

Tabela 1

Okresy i metody badań wałów wirników generatorów

Miejsca badań	Metoda badań				
	„borosonic”	endoskopowa	defektoskopia barwna	ultradźwiękowa	prądami wirowymi
Otwór centralny			po przekroczeniu 100 000—150 000 h		
Rowki centralne	—		po każdym wyjęciu wirnika	—	—
Żłobki podłużne	—		podczas przewijania wirnika	—	—
Osadzenia kołpaków i pierścieni mocujących	—	—	nie rzadziej niż po każdych 100 000 h	—	—
Przejścia średnic	—	—	nie rzadziej niż po 100 000 h	—	—
Wpusty, otwory	—	—	nie rzadziej niż po 100 000 h	—	—
Czopy i miejsca pod uszczelnieniami	—	—	po każdym wyjęciu wirnika	—	—

Wnioski

1. Konstrukcja i warunki pracy wałów wirników generatorów sprzyjają powstawaniu pęknięć. Pęknięcia te — jeżeli nie zostaną wykryte — mogą spowodować niebezpieczną awarię turbosespołu.

2. W celu zwiększenia niezawodności pracy wałów wirników generatorów należy poddawać je badaniom okresowym, a ponadto — w razie powstania nie wyjaśnionych, nadmiernych drgań — badaniom nadzwyczajnym.

LITERATURA

- [1] Mirenburg Ł. A.: Remont rotorów turbiny generatorów w stacjonarnych ustojach. Gosudarstvennoje Energeticzeskije Izdatielstwo, Moskwa 1959
- [2] Spencer R. C., Timo D. P.: Starting at loading of large steam turbines. Pace Am. Power Conf., Vpl. 36, Chicago III, 1974
- [3] *Energy International* V. 14, No 13, 1977
- [4] *Electrical Times* No 4443, 1977
- [5] *The Engineer* V. 246, No 6378, 1978
- [6] Kudriawcew I. W., Szokow N. A.: Analiz słuczajew rozruszenia wałów rotorów krupnych turbogeneratorów. *Energomaszynostrojenije* nr 11, 1980

proNovum

10 lat Pro Novum