

Andrzej Bytnar, Instytut Energetyki, Warszawa

Adam Biernat, Wojciech Urbański, Politechnika Warszawska, Warszawa

WYBRANE PROBLEMY KONSTRUKCYJNE I TECHNOLOGICZNE W MASZYNACH ELEKTRYCZNYCH W ASPEKCIE DIAGNOSTYKI

SELECTED PROBLEMS OF ELECTRICAL MACHINES' CONSTRUCTION AND TECHNOLOGY: THE ASPECT OF DIAGNOSTICS

Abstract: The article is a summary of dozen-year experience of workers researching at Institute of Electrical Machines of Warsaw University of Technology and at Institute of Power Engineering. The professional experience has been related to technical diagnosis of engines, generators and energetic transformers. The authors form postulates to constructors and electrical machine creators. The aim of these statements is to prepare the devices suitably to be able to conduct efficient diagnostics offline as well as online. Even though the diagnostics has been taken into consideration what has succeeded in an improvement, services of motion maintenance and technical supervision have still been encountering numerous problems connected with receiving signals needed in the process of creating the right diagnosis. Crucial difficulties appear every time when the examined machine junctions are tried to be reached or appropriate sensors are installed, etc. The analysis has been done with the connection of types of signals listed below: vibration, electromagnetic, thermal.

1. Wstęp

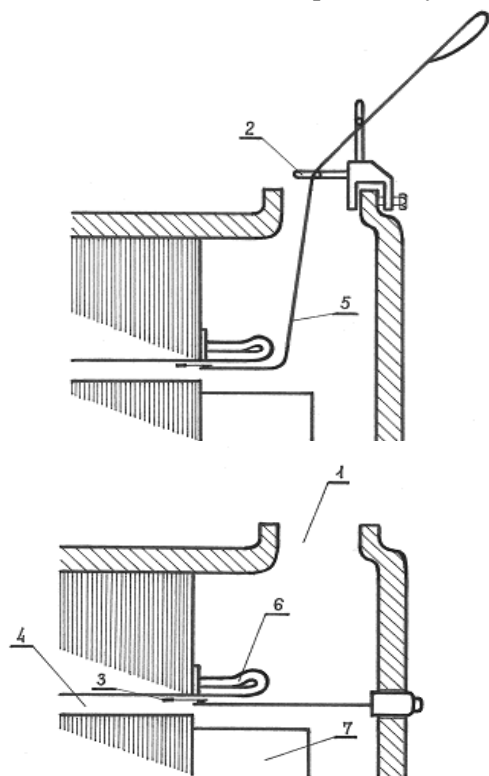
Rozwój przemysłu i energetyki oraz związana z nim postępująca konkurencja rynkowa, zmusza producentów do systematycznego doskonalenia wyrobów zarówno w zakresie modernizacji istniejących, jak i projektowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych. Także dostawcy maszyn elektrycznych muszą podporządkować się regułom gry rynkowej poprzez stałe podnoszenie jakości towarów. Dbłość o poziom techniczny produktu rozpoczynać się musi z chwilą ustalania założeń projektowych i trwać do momentu opuszczenia wytwórni przez gotowy wyrób. Przed projektantem stawiane są obecnie rozliczne zadania, nawet tak szczegółowe jak ergonomiczność czy estetyka, nie docenia się jednak jednego z zasadniczych aspektów charakteryzujących udaną konstrukcję, tj. jej podatności na badania wykonywane przez służby utrzymania ruchu i serwisowe. Wieloletnie doświadczenia diagnostów dowodzą [3,4,5,9], iż w dalszym ciągu dotarcie z odpowiednimi czujnikami w wybrane węzły diagnostyczne przysparza istotnych problemów. Z tego właśnie powodu zaprojektowanie sprawnych i łatwych w obsłudze mierników jest złożonym problemem. Mimo nowoczesnych rozwiązań układowych przyrządy bywają nieakceptowane ze względu na skomplikowany system uchwytów, wysięgników i trzymadeł pozycjonujących sondy pomiarowe. Problemy te

rozwiązać mogą zmiany konstrukcyjne wprowadzone do produkowanych i projektowanych maszyn elektrycznych. Przegląd postulatów diagnostów przynosi zaskakujący wniosek, że bardzo różnorodne potrzeby mogą zostać zaspokojone dzięki stosunkowo niewielkim poprawkom, nie zmieniającym zasadniczej struktury maszyn. Jako przykład ilustrujący tę tezę przytoczone zostaną rozwiązania korzystne dla służb diagnozujących maszyny prądu stałego (przede wszystkim trakcyjne), silniki indukcyjne oraz turbogeneratory.

2. Silniki prądu stałego

Rejestracja rozkładu pola magnetycznego wywołanego prądem twornika w maszynach prądu stałego umożliwia wykrycie jednego z najtrudniej diagnozowalnych uszkodzeń, tj. zwarć zwojowych w obwodzie twornika. Metody wykrywania tego rodzaju zwarć w oparciu o inne sygnały np.: spadki napięć międzywycinkowych, obciążone są wieloma wadami i nie znalazły powszechnego uznania. Realizacja pomiaru wymaga umieszczenia w szczelinie powietrznej pod biegunem głównym sondy hallotronowej, rejestrującej zmiany indukcji magnetycznej wywołanej przepływającym przez twornik prądem elektrycznym. Ponieważ wirnik w tym czasie obracany jest z niewielką prędkością, sonda hallotronowa musi pewnie przyle-

gać do nabiegownika, w przeciwnym razie bowiem zostanie zniszczona przez zęby wirnika.



Rys. 1. Sposób mocowania sondy diagnostycznej w silniku klasycznym i modyfikowanym. 1- otwór rewizyjny, 2 - uchwyt, 3 - sonda Halla, 4 - szczelina przywornikowa, 5 - wysięgnik sprężysty, 6 - uzwojenie kompensacyjne, 7 - komutator

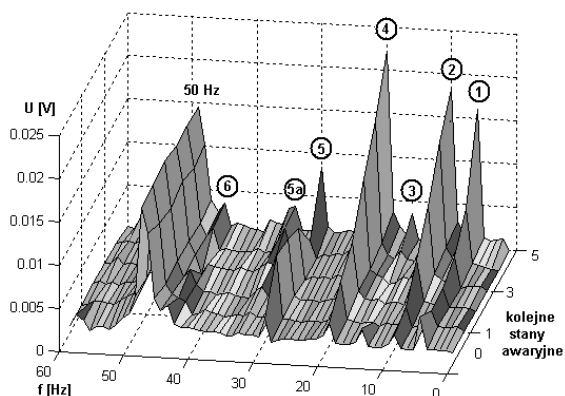
Wprowadzenie czujnika przez otwory rewizyjne znajdujące się nad aparatem szczotkowym jest bardzo niewygodne, szczególnie w maszynach większej mocy z uzwojeniami kompensacyjnymi. Dla sprawnej realizacji pomiarów wystarczyłoby zaprojektować parę otworów o średnicy ok. 40 mm, w obu tarczach łożyskowych. Otwory te winny się znajdować naprzeciw siebie, np. w dolnej części maszyny, w osi szczeliny przywornikowej (w maszynach prądu stałego – pod biegunem głównym, w pobliżu zestyku szczotka – komutator). W przypadku silników indukcyjnych wziernik umożliwiłby kontrolę dokładności montażu, stopnia zużycia łożysk, ugięcia wału, zapylenia wnętrza – co w tej grupie maszyn, o niewielkiej szczelinie, jest wręcz konieczne. Ponieważ wszystkie dodatkowe wzierniki zwiększają zagrożenie obniżenia stopnia ochrony (szczególnie przy niestarannej obsłudze), celowym byłoby zapatrzeć je w gwint, zaś śruby zaślepiające - w łożyska wymagający użycia nietypowego klucza.

Umożliwiłyby to pewne uszczelnienie otworu i zapobiegało przypadkowemu odkręceniu. Wprowadzane czujniki mocowane będą do walcowego uchwyty, na którego zewnętrznej powierzchni również wytoczono by ten sam gwint, gwarantujący trwałe i jednoznaczne umiejscowienie ich we wnętrzu maszyny.

3. Silniki indukcyjne klatkowe

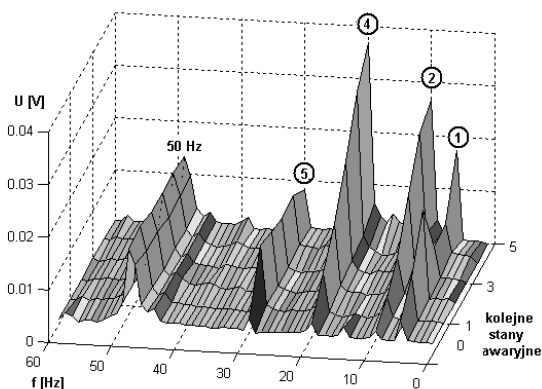
Często występującą niesprawnością silników indukcyjnych klatkowych jest uszkodzenie połączeń prętów wirnika z pierścieniem czołowym. Uszkodzenie to początkowo nie ogranicza możliwości realizowania zadania napędowego, jednak w wyniku wzrostu prądów płynących w sąsiednich prętach klatki kontynuowanie pracy prowadzi do rozwoju awarii i w rezultacie do uszkodzenia maszyny. Pełne rozpoznanie tego typu uszkodzeń sprawia istotne trudności, dlatego duży nacisk kładzie się na opracowanie metod nieinwazyjnych, umożliwiających diagnozowanie wirników maszyn indukcyjnych podczas normalnej eksploatacji, bez potrzeby ich demontowania. Badania realizowane w IME PW dowodzą skuteczności diagnostyki klatek wirników silników indukcyjnych za pomocą pomiaru pola rozproszenia wałowego. Składowa osiowa strumienia występującego w przestrzeni poza rdzeniem maszyny zamykająca się poprzez jej wał jest sumą strumieni czoł uzwojeń stojana, pierścieni klatki wirnika i końców pakietu stojana. W idealnie symetrycznej maszynie elektrycznej osiowy strumień w wale maszyny nie powinien występować. Awaria pręta wirnika prowadzi do zniekształcenia przepływu wirnika w miejscu uszkodzenia. Ponieważ do tej pory nie uwzględnia się postulatu środowisk diagnostycznych, by zapewnić w konstrukcji silników indukcyjnych miejsca do mocowania cewki wałowej, przeto w warunkach laboratoryjnych jedynie dostępnym rozwiązaniem było umieszczenie jej na jednym (z dwóch wyprowadzonych) końcu wału silnika. We wszystkich symulowanych stanach awaryjnych dzięki analizie napięcia z cewki pomiarowej uzyskano informację o rozwoju stanu awaryjnego klatki wirnika. Duże znaczenie miało wykazane wyraźne zróżnicowanie wyników pomiarów, także w zależności od rodzaju awarii (1, 2 lub 3 grupy przerwanych prętów). Podczas eksperymentu, w pierwszej jego fazie, odłączano kolejno pięć prętów wirnika. Wyniki badań, w postaci widma częstotliwościowego wyznaczonego dla

każdego stanu awaryjnego, przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Widmo niskoczęstotliwościowe napięcia indukowanego w stanie bezawaryjnym współmierne z obrotami wirnika. Kolejne stany awaryjne oznaczają rozwój awarii w 1, 2, 3, 4 oraz 5 kolejnych prętach wirnika. Numerami od 1 do 6 zaznaczono niskoczęstotliwościowe składowe harmoniczne < 40 Hz, których amplituda zmienia się wraz z rozwojem awarii

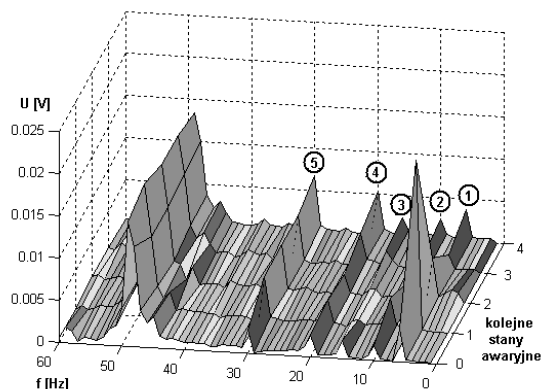
W następnej fazie eksperymentu kolejno odłączano pręty wirnika o numerach 1, 2, 3, 4, 5 oraz 17, 18, 19, 20, 21 znajdujące się po przeciwnych stronach wirnika. Na koniec symulowana była awaria pięciu obok siebie położonych prętów, symetrycznie po obu stronach wirnika. Wyniki eksperymentu w postaci widma częstotliwościowego wyznaczonego dla każdego kolejnego stanu awaryjnego przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Widmo niskoczęstotliwościowe napięcia indukowanego w stanie bezawaryjnym współmierne z obrotami wirnika. Kolejne stany awaryjne oznaczają rozwój awarii w dwóch grupach prętów wirnika

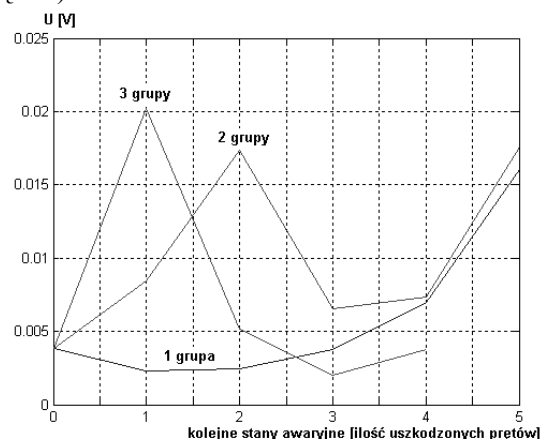
Ostatnie z modelowanych uszkodzeń to kolejno odłączane pręty wirnika o numerach 1, 2, 3, 4 i 12, 13, 14, 15 oraz 23, 24, 25, 26. Były one

rozłożone symetrycznie na obwodzie wirnika. W końcowej fazie eksperymentu przeprowadzono symulację awarii jednocześnie czterech kolejnych prętów położonych symetrycznie na obwodzie wirnika. Wyniki eksperymentu w postaci widma częstotliwościowego wyznaczonego dla każdego stanu awaryjnego przedstawiono na rys. 4.

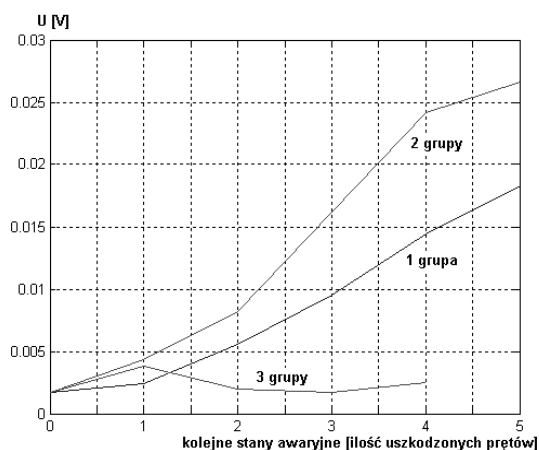


Rys. 4. Widmo niskoczęstotliwościowe napięcia indukowanego w stanie bezawaryjnym współmierne z obrotami wirnika. Kolejne stany awaryjne oznaczają rozwój awarii w trzech grupach prętów wirnika. Numerami od 1 do 5 (analogicznie jak na rys. 2 i rys. 3) zaznaczono niskoczęstotliwościowe składowe harmoniczne < 40 Hz, których amplituda zmienia się wraz z rozwojem awarii

We wszystkich symulowanych układach dzięki analizie napięcia z cewki pomiarowej, uzyskano informację o rozwoju stanu awaryjnego klatki wirnika. Duże znaczenie ma tu wykazane wyraźne zróżnicowanie wyników pomiarów, także w zależności od rodzaju awarii (1, 2 lub 3 grupy prętów).

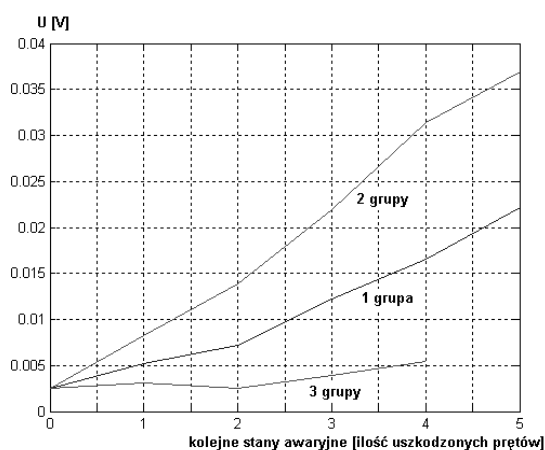


Rys. 5. Zmiana amplitudy składowej harmonicznej oznaczonej numerem 1 wraz z rozwojem awarii w zależności od położenia niesprawnych grup prętów wirnika



Rys. 6. Zmiana amplitudy składowej harmonicznej oznaczonej numerem 2 wraz z rozwojem awarii w zależności od położenia niesprawnych grup prętów wirnika

Uzyskane wyniki (rys. 5, 6, 7) mogą być podstawą opracowania skutecznych miar diagnostycznych przy wykorzystaniu informacji, które niesie strumień rozproszenia wałowego. Dlatego też postulat środowisk diagnostycznych, aby w konstrukcji silnika indukcyjnego uwzględnić miejsce mocowania cewki wałowej wydaje się być jak najbardziej uzasadniony. Proponowane jest miejsce wokół niedostępnego końca wału, na którym mocowany jest wentylator.



Rys. 7. Zmiana amplitudy składowej harmonicznej oznaczonej numerem 3 wraz z rozwojem awarii w zależności od położenia niesprawnych grup prętów wirnika

4. Turbogeneratory

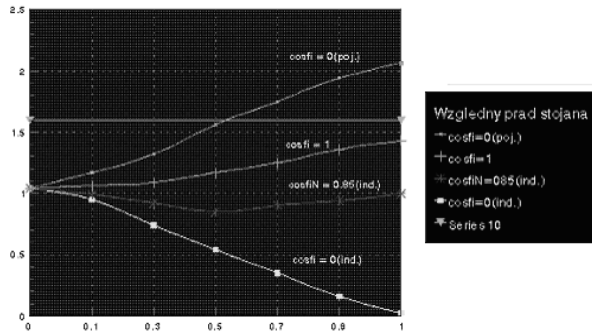
4.1. Nadmierne nagrzewanie elementów skrajnych stojana turbogeneratora

Szczególne miejsce wśród zadań służb diagnostycznych zajmuje nadzór nad prawidłową eks-

ploatacją podstawowych maszyn bloków energetycznych, czyli turbogeneratorów. Niektóre z nich są wyposażone w bardzo zaawansowane systemy pozyskiwania i analizy sygnałów fizycznych (wibracji i nagrzewania podstawowych elementów stojana), które umożliwiają wypracowanie diagnozy aktualnego stanu technicznego. Diagnoza taka jest niezmiernie istotna dla turbogeneratorów pracujących w cyklu zmiennych obciążeń, ten bowiem rodzaj pracy często przyspiesza proces degradacji głównych elementów stojana.

W aktualnie realizowane plany modernizacyjne bloków energetycznych zwykle wpisywane są zadania dotyczące zwiększenia mocy czynnej turbogeneratorów. Wyniki badań wskazują, że istotnym czynnikiem ograniczającym takie przedsięwzięcia mogą być nadmierne wartości temperatury skrajnych pakietów i pierścieni dociskowych rdzeni stojanów maszyn. Przyczyna narażeń termicznych związana jest z intensyfikowaniem się w tym obszarze wypadkowego skojarzonego strumienia rozproszenia połączeń czołowych uzwojenia stojana i wirnika. Jego wartość zależy głównie od wartości prądu i napięcia stojana oraz współczynnika mocy [5]. Przy działaniach rekonstrukcyjnych nie bierze się, na ogół, pod uwagę tego zjawiska, a potencjalną przesłankę wzrostu mocy czynnej wiąże się z „zapasem cieplnym” uzwojenia stojana i wirnika.

Także wartość współczynnika mocy jest krytyczna dla trwałości turbogenerators; szczególnym zagrożeniem jest długotrwała praca przy współczynniku mocy indukcyjnym $\cos\phi_{ind} > \cos\phi_N$ (rys. 8) oraz pojemnościowym $\cos\phi_{poj} < 1$. Implikuje ona silnym wzrostem strumieni rozproszenia połączeń czołowych uzwojenia stojana i wirnika i eskaluje wydzielaniem się znacznych ilości ciepła w skrajnej strefie stojana. Efektem silnego przegrzewania i wibracji blach rdzenia jest ich korozja cieplna i cierna, której produkty (pył ferromagnetyczny) unoszone są przez gazowy czynnik chłodzący, krążący obiegu wentylacyjnym maszyny. Niejednokrotnie powodował on zwarcia w uzwojeniu wirnika turbogenerators (np. pod kołpakami).



Rys. 8. Zależności wartości względnych wypadkowej indukcji rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika B_{tar} od wartości względnej prądu twornika I_r , przy różnych współczynnikach mocy (dla dużego turbogeneratora)

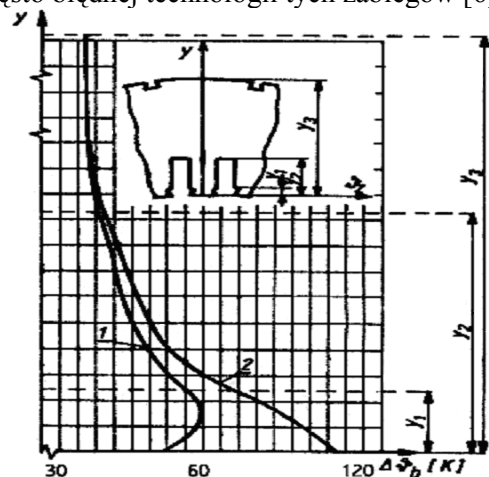
Obserwacje potwierdzone zebrany materiałem badawczym wskazują na konieczność ciągłego pomiaru temperatury skrajnych elementów stojana w tym, przede wszystkim, palców dociskowych. Ich stan termiczny był obejmowany stałym nadzorem w niektórych turbogeneratorach, ale niestety od wielu lat odstąpiono powszechnie od tej zasady. Doświadczenia diagnostów dowiodły dodatkowo, iż przy identyfikacji obszarów największych zagrożeń cieplnych w strefie skrajnej stojana należy zwracać uwagę na istotny brak symetrii zjawisk magnetycznych i termicznych wzdłuż obwodu bezki stojana. Oprócz montażu dodatkowych czujników temperatury wskazywane są także kolejne postulaty ograniczania zagrożeń destrukcyjnych poprzez:

- ograniczenie czasu pracy przy napięciach stojana mniejszych od 95% znamionowego,
- wyznaczenie odpowiednich krzywych temperaturowych ograniczających obciążenia na wykresie pracy turbogeneratora,
- wprowadzenie boczników i ekranów magnetycznych dla strumieni rozproszenia,
- uintensywnienie chłodzenia skrajnych elementów stojana.

4.2. Wibracje elementów stojana

Z oględzin wideoskopowych stojanów turbogeneratorów wynika, że ich rdzenie, węzły zawieszenia rdzenia w korpusie oraz połączenia czołowe uzwojeń ulegają często uszkodzeniu, głównie na skutek występujących nadmiernych wibracji. Na wibracje elementów stojana mają wpływ (przy występujących wymuszeniach elektromagnetycznych wynikających z zasady działania maszyny synchronicznej) siły reakcji

związane z cechami mechanicznymi, takimi jak: sprężystość, tłumienie, częstotliwości wibracji własnych. Wartości tych parametrów ulegają zmianie podczas eksploatacji turbogeneratora [1,5]. Proces intensyfikowany jest stopniowym zmniejszeniem sił prasowania, mocowania elementów, degradacją izolacji itp. Właściwa ocena stopnia wyeksploatowania poszczególnych modułów jest bardzo istotna dla właściwego planowania i przeprowadzenia remontu. Doświadczenia diagnostów wskazują, iż na wibracje elementów stojana znaczący wpływ mają również siły termomechaniczne powstające w wyniku zjawisk dylatacyjnych rdzenia i uzwojenia stojana. Wymienione zjawiska fizyczne prowadzą w konsekwencji do rozwarstwień skrajnych części rdzenia, uszkodzeń mechanicznych (wycierania i łamania) rozpórek w kanałach wentylacyjnych i blach w obszarze zębowym oraz do ich zwarć i wypaleń [6]. Podczas napraw, dla przywrócenia właściwego ciśnienia w zębach rdzenia i udroźnienia kanałów wentylacyjnych, wbija się dodatkowe rozpórki do kanałów promieniowych. Ich liczba, rozmiary oraz sposób umocowania muszą być ta dobrane, by nie wzrastała nadmiernie temperatura w zębach rdzenia na skutek pogorszonych warunków chłodzenia. Niestety obserwowana praktyka w tym względzie, nie weryfikowana przez obliczenia i pomiary (rys. 9), dowodzi często błędnej technologii tych zabiegów [6].



Rys. 9. Przyrost temperatury z zębem i jarzmiem skrajnej części rdzenia stojana dużego turbogeneratora:

- 1 - przy niezakłóconym przepływie wodoru w promieniowych kanałach wentylacyjnych,
- 2 - przy zmniejszonym przekroju kanału po wbiciu dwóch dodatkowych (obok siebie) klinów rozporowych na wysokości zęba

Wymienione wcześniej przesłanki implikują ostatecznie wskazaniem, iż bezwzględnie należy instalować czujniki do pomiaru wibracji w skrajnych częściach rdzenia i korpusu oraz na połączeniach czołowych uzwojenia stojana turbogeneratora (głównie w kierunkach promieniowym i stycznym). Analizowanie tych sygnałów w systemie *on-line* umożliwi rzeczywistą ocenę stanu technicznego turbogeneratorów.

5. Wnioski

Uszkodzenia maszyn elektrycznych są źródłem poważnych strat, od ich poprawnego funkcjonowania uzależniona jest bowiem realizacja procesów technologicznych, sprawny transport, bezpieczeństwo pracy. Prawidłowo prowadzona diagnostyka może straty obniżyć, a nawet w ogóle im zapobiec. Ułatwienie diagnostom pozyskiwania odpowiednich sygnałów pomiarowych leży zdecydowanie w interesie producentów. Na wybranych kilku przykładach wykazano, że w każdej z grup maszyn elektrycznych już podczas projektowania należy przewidzieć możliwość dotarcia do istotnych punktów konstrukcji, a następnie zaopatrzyć w odpowiednie czujniki właściwe dla mocy i roli, jaką zajmują w systemie przetwarzania energii. Podobne przygotowanie konstrukcji jest obecnie cenną, godną reklamy CECHA – ale niedługo stanie się, bez wątpienia, NIEZBĘDNYM WARUNKIEM skutecznego wprowadzenia na rynek nowo projektowanych i produkowanych maszyn elektrycznych.

Literatura

- [1]. Atamanov V.V.: *Kontrol' sostojanija krajnih paketov aktivnoj stali turbogeneratora pod nagruzkaj. Električeskie Stancii*, nr 6, 2005.
- [2] Belkhat D., Romary R., El Adnani M., Corton R., Brudny J.: *Faults detection of Induction Machines by radial field measurement*. Journal of Electrical Engineering, Vol. 54, No. 11-12, 2003, pp. 287-292.
- [3] Biernat, A. Bytnar, G. Kamiński: *Model do badań diagnostycznych uszkodzeń klatki wirnika silnika indukcyjnego*. SME 2005, Jarnołtówek, s. 617-626.
- [4]. Biernat A., Urbański W.: *Aspekt diagnostyczny w projektowaniu maszyn elektrycznych*. Konferencja n-t "Jakość wyrobów elektrotechnicznych" JAW'94. Lublin 1994, s. 37-42.
- [5]. Bytnar A.: *Obciążalność dużego turbogeneratora w aspekcie niektórych zjawisk fizycznych występujących w jego stojanie*. WPW Elektryka, z. 94, 1990.
- [6]. Bytnar A.: *Turbogenerator stator failures due to some physical phenomena*. PUT Academic Journal, Electrical Engineering, No 2, 2007.
- [7] Drak B.: *Analiza awarii silników indukcyjnych dużej mocy prądu przemiennej*. SME 2004, Hajnówka, s. 173-178.
- [8]. Gawroński T., Skulimowski K., Urbański W.: *Profilaktyczne badania silników w diagnostyce przemysłowych napędów elektrycznych*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 68, 2004, wyd. BOBRME Komel, s. 27 – 32.
- [9]. Popiołek M., Urbański W.: *Diagnostyka wirników silników prądu stałego*. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 1 1992, s. 15-17.
- [10] Rusek J.: *Program do diagnostyki maszyn indukcyjnych klatkowych – wersja in statu nascendi*. SME 2004, Hajnówka, s. 220- 225.

Autorzy

- dr inż. Adam Biernat, Instytut Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej; biernat@ime.pw.edu.pl, tel. 22-234-76-81.
- prof. dr hab. inż. Andrzej Bytnar, Instytut Energetyki, abd10@tlen.pl, tel. 22- 345-12-65.
- dr inż. Wojciech Urbański, Instytut Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej; urbanski@ime.pw.edu.pl, tel. 22-234-74-36.