

Gerard KOSMAN

Institut Maszyn i Urządzeń Energetycznych

Politechnika Śląska

ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice

kosman@polsl.gliwice.pl

ANALIZA PROCESU STYGNIĘCIA WIRNIKA TURBINY NA PODSTAWIE POMIARU TEMPERATURY METALU

Streszczenie. Opisano wyniki pomiarów temperatury metalu wirnika w czasie stygnięcia turbiny. Na tej podstawie analizowano przebieg całego procesu. Wyznaczono prędkości stygnięcia naturalnego oraz przyspieszonego (wymuszonego). Analizowano naprężenia wywołane zmieniającym się polem temperatury. Porównano uzyskane wyniki badań z dotychczas przyjmowanymi założeniami dotyczącymi stanów cieplnych wirników.

TURBINE ROTOR COOLING PROCESS ANALYSIS BASED ON METAL TEMPERATURE MEASUREMENT

Summary. This paper presents rotor temperature measurements during cooling. The results created the basis of cooling process analysis. Temperature decrease rates during self-cooling as well as forced cooling are determined. Stresses are analyzed, which are caused by temperature distribution variations. Analysis conclusions are compared to state-of-art assumptions regarding rotor thermal states.

1. Wprowadzenie

Analiza stanów cieplnych elementów turbin stanowi punkt wyjścia do określenia rozkładu naprężeń i odkształceń, a w dalszej kolejności do wyznaczenia stopnia zużycia eksploatacyjnego. Szczególnie ważna jest znajomość pól temperatury w procesach przejściowych, w czasie rozruchu, zmiany mocy oraz po zatrzymaniu turbiny.

Dotychczasowe badania nieustalonych stanów cieplnych sprowadzają się przede wszystkim do analizy procesów nagrzewania elementów w czasie rozruchów turbiny. Czasem analizuje się zmiany mocy turbiny. W odniesieniu do stygnięcia naturalnego zakłada się, że proces ten przebiega z niewielką prędkością (co jest zgodne z rzeczywistością) oraz równomiernie i bez zakłóceń (co nie zawsze jest prawdziwe). Efektem takich założeń jest przyjęcie wyrównanego rozkładu temperatury wzdłuż grubości elementu, jednakowej prędkości chłodzenia oraz pominięcie fazy stygnięcia naturalnego w modelowaniu pełnego cyklu zmian naprężeń i odkształceń.

Założenia dotyczące prędkości i równomierności stygnięcia kadłubów i zaworów można zweryfikować doświadczalnie poprzez pomiar temperatury metalu w kilku punktach wymienionych elementów. W przypadku wirników obydwa założenia nie były dotąd

weryfikowane doświadczalnie z uwagi na brak wyników pomiarów temperatury metalu wirnika.

W ramach projektu badawczego [1] opracowano i uruchomiono układ do kontroli stanów ciepłno-wytrzymałościowych i stopnia zużycia wirników turbin parowych na podstawie pomiaru temperatury metalu. W niniejszej pracy wykorzystano opracowany układ pomiarowy do analizy procesu stygnięcia wirników turbin.

Celem podjętych badań było:

- sprawdzenie możliwości pomiaru temperatury metalu wirnika w czasie stygnięcia turbiny,
- wyznaczenie prędkości chłodzenia,
- weryfikacja założeń dotyczących równomierności procesu stygnięcia,
- wyznaczenie naprężeń, przede wszystkim w czasie zakłócenia równomierności przebiegu procesu stygnięcia i osiągnięcia większych prędkości chłodzenia.

2. Analiza stygnięcia wirnika na podstawie pomiaru temperatury metalu na powierzchni zewnętrznej

W czasie kilku odstawień turbiny mierzono temperaturę powierzchni zewnętrznej wirnika cz. WP. Temperaturę wirnika mierzono pomiędzy kadłubem zewnętrznym i stojakiem łożyskowym turbiny 13K215. Na czas pomiaru wyłączano obracarkę wału. Wyznaczone w ten sposób przebiegi czasowe temperatury powierzchni zewnętrznej wirnika wykorzystano do modelowania rozkładu temperatury wzdłuż promienia wału.

2.1. Stygnięcie naturalne

Wyniki pomiarów i obliczeń rozkładu temperatury w czasie naturalnego stygnięcia wału przedstawiono na rys. 1. Stosowano następujące oznaczenia:

T_z , T_w - temperatura na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej wirnika,

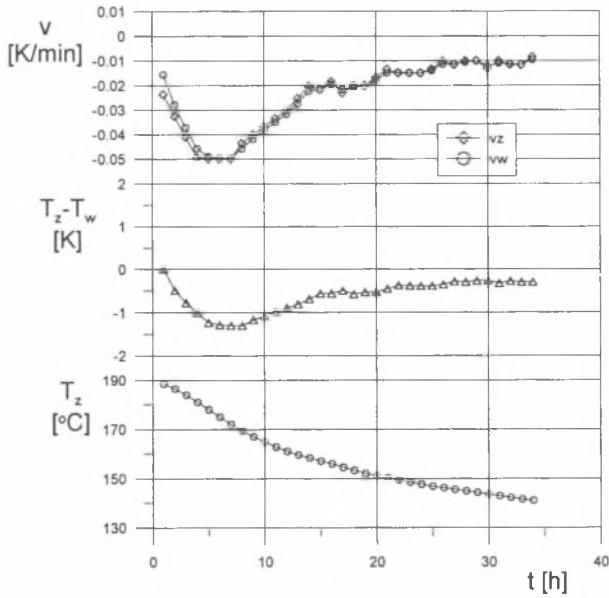
v_z , v_w - prędkość chłodzenia powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej wirnika.

Dla chłodzenia naturalnego przebiegi zmian temperatury powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej pokrywają się co oznacza, że wirnik w tak długim czasie chłodzi się równomiernie w całym przekroju. Z tego względu na rys. 1 nie podawano przebiegu czasowego temperatury T_w lecz różnicę ($T_z - T_w$).

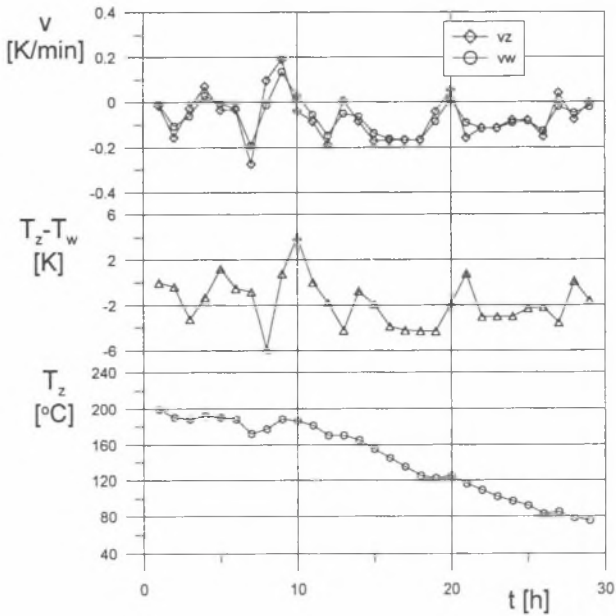
2.2. Chłodzenie wymuszone

Wyniki pomiarów i obliczeń niestabilnego rozkładu temperatury w wirniku w czasie chłodzenia wymuszonego przedstawiono na rys. 2. Stosowano te same oznaczenia jak poprzednio na rys. 1. Pozostają również słuszne wnioski podane wyżej.

Do przyspieszenia procesu stygnięcia zastosowano chłodzenie turbiny sprężonym powietrzem. Jest to metoda, która umożliwia pełną kontrolę przebiegu procesu pod względem cieplnym i wytrzymałościowym. W czasie chłodzenia wymuszonego prędkości chłodzenia są znacznie wyższe niż w czasie naturalnego stygnięcia. Dla chłodzenia pokazanego na rys. 2 średnia prędkość chłodzenia jest prawie czterokrotnie większa od maksymalnej (i trwającej bardzo krótko) prędkości stygnięcia naturalnego (rys. 1).



Rys. 1. Wyniki analizy procesu naturalnego stygnięcia wału
 Fig. 1. Rotor self-cooling analysis results

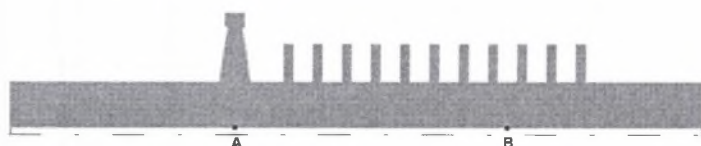


Rys. 2. Wymuszone chłodzenie wirnika cz. WP
 Fig. 2. Forced cooling of HP rotor

3. Analiza stygnięcia wirnika na podstawie pomiaru temperatury metalu w otworze centralnym wirnika

3.1. Stygnięcie I

Pierwsze, próbne pomiary temperatury metalu wirnika WP przeprowadzono w czasie naturalnego stygnięcia turbiny. Punkty pomiaru temperatury umieszczono w otworze centralnym wirnika, w przekroju stopnia regulacyjnego (punkt A) oraz w obrębie pierwszego upustu, pomiędzy 9 i 10 stopniem części WP (punkt B) [2].



Rys. 3. Punkty pomiaru temperatury metalu w otworze centralnym wirnika

Fig. 3. Temperature converters location in central void

Opis zastosowanego układu pomiarowego temperatury metalu wirnika, zasady transmisji danych, charakterystykę toru pomiarowego omówiono w pracach [3,4]. Układ pomiarowy rejestruje sygnały temperaturowe przez cały okres stygnięcia, w sekwencji 5 min. Zarejestrowane sygnały temperaturowe po wstępnej obróbce w module diagnostycznym stanowiły punkt wyjścia do oceny stanu cieplnego wirnika.

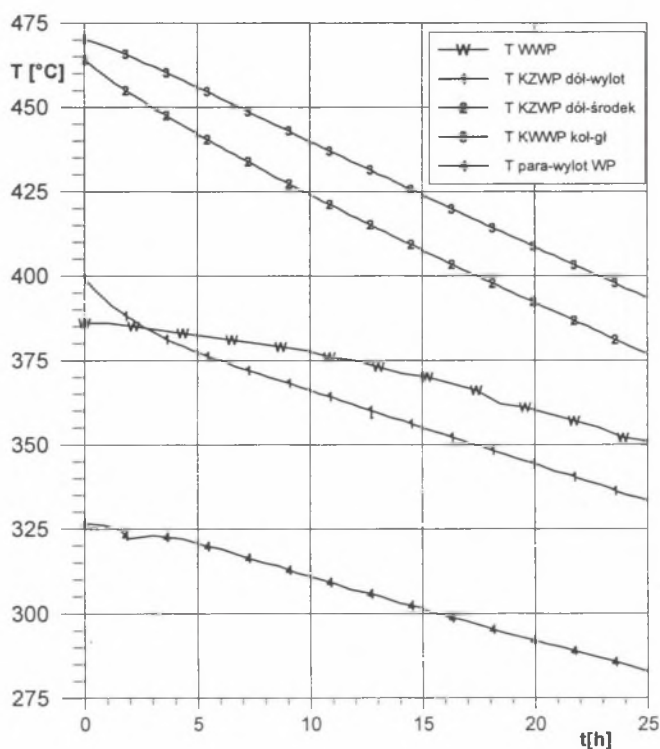
W pierwszym okresie badań uruchomiono tylko pomiar temperatury w otworze centralnym wirnika w punkcie B (rys. 3). Na rysunku 4 przedstawiono uzyskany z pomiarów przebieg czasowy temperatury metalu wirnika. Wykres ten obejmuje okres 25 godzin stygnięcia. Na tym samym rysunku zamieszczono dodatkowo przebiegi czasowe temperatury metalu kadłuba wewnętrznego i zewnętrznego WP. Dla porównania podano również temperaturę pary na wylocie z WP.

Na rysunku 4 stosowano następujące oznaczenia:

- TWWP - temperatura metalu wirnika pomiędzy 9 i 10 stopniem części WP,
- TKZWP dół-wylot - temperatura dolnej części kadłuba zewn. WP (wylot)
- TKZWP dół-środek - temperatura dolnej części kadłuba zewn. WP (środek)
- TKWWP koł-gł. - temperatura kołnierza kadłuba wewn. WP (pomiar głęboko)
- T para-wylot WP - temperatura pary na wylocie z części WP

Ponieważ analizowane pomiary opisują proces stygnięcia turbiny, nie można w zasadzie mówić o temperaturze pary wylotowej.

Wyniki pomiarów temperatury wirnika w otworze centralnym wykorzystano do rozwiązania odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła (rys. 5). Zakres obliczeń obejmował wyznaczenie nieustalonego rozkładu temperatury wzdłuż promienia wirnika, temperatury powierzchni zewnętrznej oraz prędkości stygnięcia powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej wału. Do rozwiązania odwrotnego zagadnienia ciepła zastosowano procedury opisane w [5].



Rys. 4. Wyniki pomiaru temperatury wirnika w czasie naturalnego stygnięcia
Fig. 4. Self-cooling temperature measurements results

Na rys. 5 stosowano następujące oznaczenia:

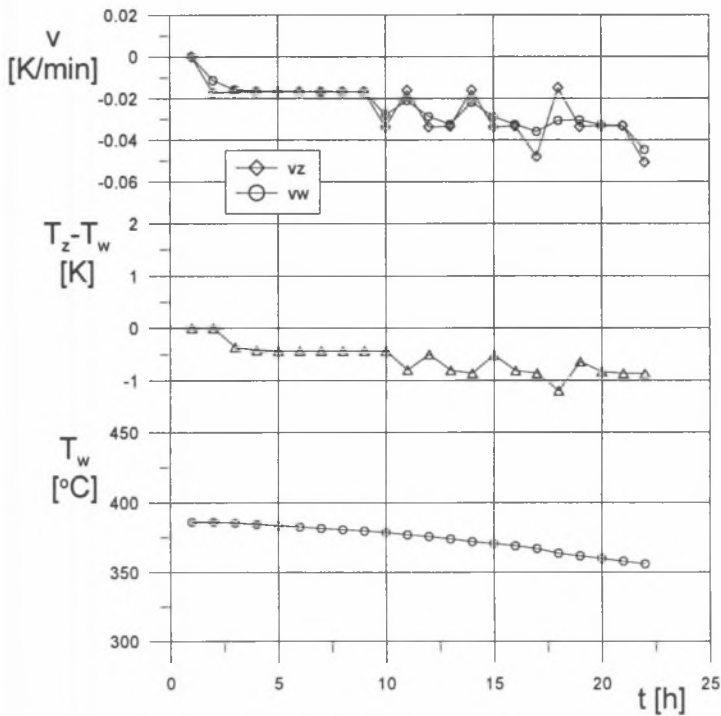
T_z , T_w - temperatura na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej wirnika,

v_z , v_w - prędkość chłodzenia powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej wirnika.

Dla chłodzenia naturalnego przebiegi zmian temperatury powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej pokrywają się, co oznacza, że wirnik w tak długim czasie chłodzi się równomiernie w całym przekroju. Z tego względu na rys. 5 nie podawano przebiegu czasowego temperatury T_w lecz różnicę ($T_z - T_w$).

Proces stygnięcia kadłuba wewnętrznego (przebieg nr 3 na rys. 4) i zewnętrznego (przebieg nr 2) przebiega praktycznie z jednakową prędkością. I tak np. w okresie pomiędzy 5 i 10 godziną stygnięcia prędkość ta wynosi ok. **0.05 K/min**. W tym samym czasie wirnik stygnie z średnią prędkością ok. **0.017 K/min**, tzn. prawie trzykrotnie wolniej. W dalszej fazie stygnięcia prędkość ta nieznacznie wzrasta i np. w okresie pomiędzy 15 i 20 godziną stygnięcia prędkość ta wynosi ok. **0.033 K/min**.

Końcowy etap stygnięcia (nie pokazany na rys. 4 i 5) charakteryzuje się zmniejszającymi się prędkościami zmian temperatury. Uwaga ta dotyczy zarówno wirnika, jak i kadłubów.



Rys. 5. Wyniki identyfikacji stanu cieplnego wirnika na podstawie pomiaru temperatury w otworze centralnym

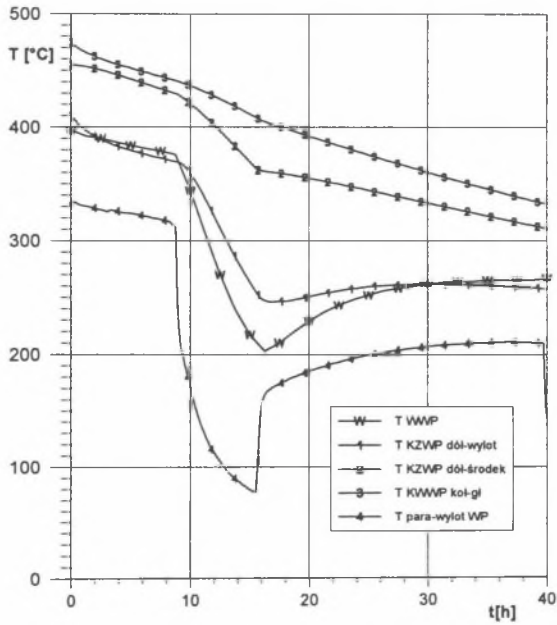
Fig. 5. Thermal state assessment based on temperature measurements in central void

3.2. Stygnięcie II

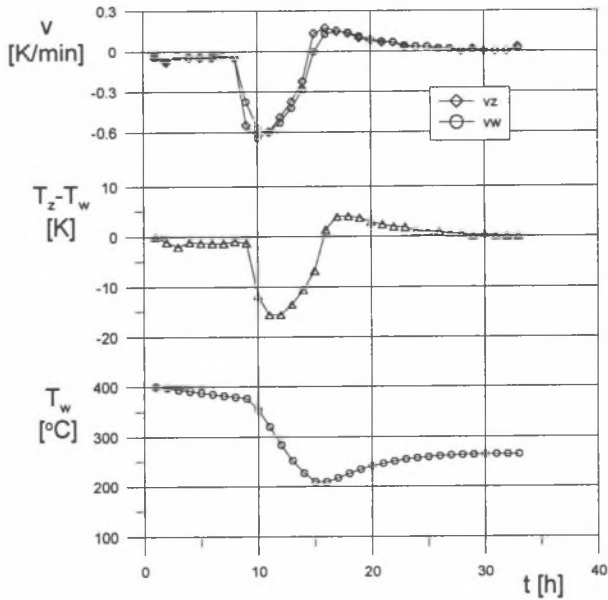
Wyniki pomiarów przedstawiono rys. 6. Na wspólnym wykresie naniesiono przebiegi czasowe temperatury wirnika (WWP) oraz temperatury kadłuba wewnętrznego (KWWP) i zewnętrznego (KZWP). Dla porównania podano również temperaturę czynnika (powietrza) omywającego elementy turbiny w okolicy wylotu z części WP (oznaczenie: T para-wylot WP, bo w czasie pracy turbiny w punkcie tym mierzy się temperaturę pary).

Przebiegi czasowe na rys. 6 obejmują okres 40 godzin stygnięcia. W pewnym momencie przebieg procesu został zakłócony. Stwierdzono bardzo intensywne obniżenie się temperatury (T para-wylot WP). W konsekwencji nastąpiło bardzo gwałtowne schłodzenie wirnika i kadłuba zewnętrznego w części wylotowej.

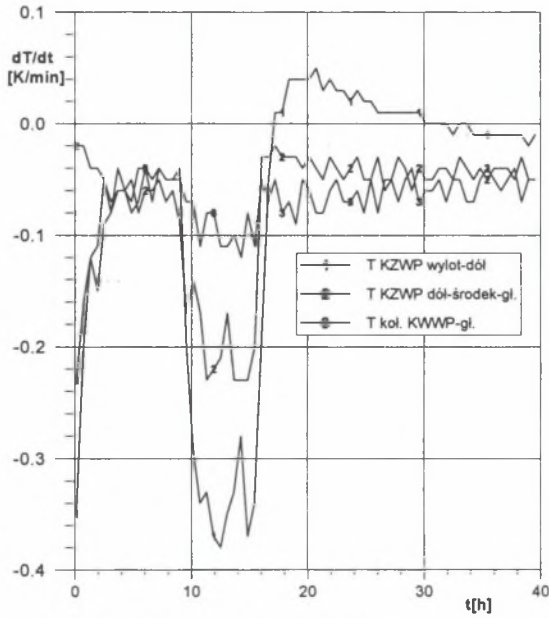
Wyniki pomiarów temperatury wirnika w otworze centralnym wykorzystano do rozwiązania odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła (rys. 7). Analiza stanu cieplnego wirnika wskazuje, że maksymalna prędkość chłodzenia przekroczyła wartość **0.6 K/min**. Jest to zdecydowanie większa wartość od uzyskanej w czasie stygnięcia opisanego w punkcie 5. Jest to również prędkość wyższa od prędkości chłodzenia kadłubów (rys. 8).



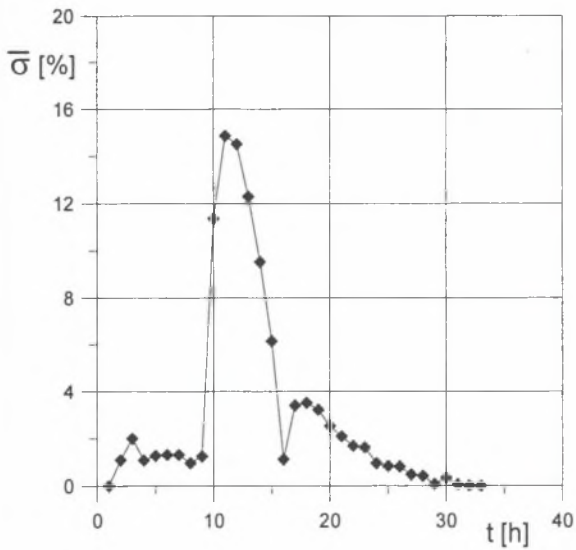
Rys. 6. Wyniki pomiarów
 Fig. 6. Measurements results



Rys. 7. Opis stanu cieplnego wirnika w czasie stygnięcia
 Fig. 7. Thermal state during turbine cooling



Rys. 8. Prędkości stygnięcia kadłuba wewnętrznego i zewnętrznego
 Fig. 8. Causing temperature decrease rate during cooling



Rys.9. Zmiana naprężeń w wirniku w czasie stygnięcia
 Fig. 9. Rotor stresses during cooling

Zwiększenie prędkości chłodzenia spowodowało wzrost naprężeń cieplnych. Przebiegi czasowe maksymalnych naprężeń zredukowanych w wirniku w czasie stygnięcia pokazano na rys. 9. Są to naprężenia względne odniesione do naprężeń dopuszczalnych. W czasie opisanego wyżej schłodzenia wirnika wystąpił zauważalny wzrost naprężeń. Wartość maksymalna naprężenia zredukowanego jest jednak znacznie niższa od wartości dopuszczalnej.

4. Podsumowanie

- Opisaną w punkcie 2 analizę stygnięcia wirnika na podstawie pomiaru temperatury metalu na powierzchni zewnętrznej traktowano wyłącznie jako wstęp do zasadniczych badań stanów cieplnych wirników po odstawieniu turbiny. W rzeczywistych warunkach pracy turbiny prowadzenia pomiarów w sposób opisany w punkcie 2 nie jest możliwy.
- Układ zastosowany do pomiaru temperatury metalu wirnika na powierzchni otworu centralnego można zastosować z powodzeniem w każdej turbinie, której wirnik posiada otwór centralny. Uzyskane na tej podstawie przebiegi czasowe temperatury metalu wirnika stanowią dane wejściowe do pełnej analizy stanu cieplnego i wytrzymałościowego wirnika.
- W prowadzonych dotąd ocenach stanu cieplnego wirników turbin przyjmuje się, że prędkość chłodzenia naturalnego lub wymuszonego wirnika jest taka sama jak prędkość chłodzenia kadłuba. Wyznaczone w ramach prowadzonych badań prędkości chłodzenia wirnika różnią się od prędkości chłodzenia kadłubów.
- Prowadzone pomiary potwierdziły równomierne chłodzenie wirnika wzdłuż grubości. Prędkości chłodzenia powierzchni zewnętrznej i otworu centralnego są prawie jednakowe.
- W pracy wykazano, że w czasie naturalnego stygnięcia dochodzi czasem do zakłócenia równomierności procesu. Wzrasta prędkość chłodzenia. Przyczyną jest zmiana temperatury czynnika omywającego wirnik. Z przeprowadzonych badań wynika, że prędkość chłodzenia wirnika wzrasta w większym stopniu niż prędkość chłodzenia kadłubów. W tej sytuacji kontrola stanu cieplnego kadłubów jest niewystarczająca.
- Zgodnie z instrukcją eksploatacji turbin dużej mocy, w trakcie całego procesu odstawiania i stygnięcia kontroluje się stan termiczny maszyny. Kontrola ta polega na pomiarze temperatury w wybranych punktach kadłubów wewnętrznych i zewnętrznych części WP i SP turbiny. Jedynym kryterium oceny przebiegu procesu stygnięcia jest dopuszczalna różnica temperatury górnej i dolnej połówki kadłuba zewnętrznego. Kryterium to, zdaniem projektantów maszyny, ma zabezpieczyć kadłub przed niebezpiecznym odkształceniem (wygięciem) w płaszczyźnie merydionalnej.
- Dotychczas nie prowadzi się żadnej kontroli procesu nagrzewania i stygnięcia wirników. Wynika to z trudności pomiaru temperatury w układzie wirującym. Z przeprowadzonym analiz wynika, że w niektórych sytuacjach taka kontrola jest wskazana. Na podstawie ciągłego pomiaru temperatury metalu wirnika można modelować cały cykl zmiany obciążenia i wyznaczyć amplitudy zmian naprężeń

i odkształceń, które decydują o zużyciu zmęczeniowym elementów, z uwzględnieniem procesu stygnięcia naturalnego lub chłodzenia wymuszonego.

Bibliografia

1. Układ do kontroli stanów cieplno-wytrzymałościowych i stopnia zużycia wirników turbin parowych na podstawie pomiaru temperatury metalu. Projekt celowy KBN. Gliwice 2000 - 2002
2. Kosman G., Kurowicz M.: Układ do pomiaru temperatury metalu wirników turbin parowych. Konferencja naukowa: Problemy i innowacje w remontach energetycznych „PIRE 2001”, Szklarska Poręba 2001
3. Kurowicz M., Stozik M.: Testowanie układu do pomiaru temperatury metalu wirników turbin parowych. Konferencja naukowa: Problemy i innowacje w remontach energetycznych „PIRE 2002”, Jugowice 2002
4. Kurowicz M.: Układ do kontroli stanów cieplno - wytrzymałościowych wirników na podstawie pomiaru temperatury metalu Zagadnienia Eksploatacji Maszyn (w druku).
5. Kosman G.: Bezpośrednia ocena stanów cieplnych i wytrzymałościowych wirników turbin parowych na podstawie pomiaru temperatury metalu. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn (w druku).