

Prof. dr hab. inż. Andrzej Błaszczyk

Łódź, dnia 11.12.2022r.

Katedra Energetyki

Wydział Techniczny

Akademia im. Jakuba z Paradyża

w Gorzowie Wielkopolskim

### Recenzja Rozprawy Doktorskiej

mgr. inż. Martyny Tomali

**„Dobór parametrów eksploatacji oraz planowanie badań diagnostycznych elementów turbin pracujących w elastycznych warunkach pracy w oparciu o analizę ryzyka”**

#### Podstawa prawna recenzji

Podstawa opracowania rozprawy doktorskiej pismo: profesora dr hab. inż. Andrzeja Rusina Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o sygnaturze RIE-BD.512.42.2022 z dnia 11.10.2022 r.

Recenzowana praca została wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina. Promotorem pomocniczym był dr inż. Adam Wojacek.

#### Struktura rozprawy

Rozprawa liczy 192 stron i jest podzielona na 8 rozdziałów numerowanych i krótkich streszczeń w językach polskim i angielskim. Dodatkowo w pracy zamieszczono wykaz ważniejszych oznaczeń, zestawienie indeksów dolnych, istotnych skrótów oraz zestawienie bibliografii obejmujące 134 pozycje.

#### Uzasadnienie wyboru tematu rozprawy

Tematyka recenzowanej pracy jest obecnie bardzo aktualna ponieważ dotyczy możliwości wydłużenia czasu pracy elementów turbin parowych o mocy nominalnej 200MW. Niektóre z nich po modernizacjach realizowały nawet moce 260 MW (Turów). Kilkanaście lat temu ogłoszony został przez NCBiR projekt badawczy modernizacji dotyczący dostosowania tych bloków do w zmiennych warunkach pracy w zakresie 40% - 100% mocy. Przewidywany wówczas zakres dotyczył: kotłów turbin parowych oraz urządzeń pomocniczych. Z różnych powodów tylko kilka bloków z 56 zostało zmodernizowanych. Obecnie ze względu na ograniczenia Unii Europejskiej dotyczące CO<sub>2</sub> i związany z tym kierunek budowy OZE powoduje zmiany w eksploatacji turbin parowych przede wszystkim o mocy 200 MW w kierunku pracy regulacyjnej charakteryzującej się cyklicznością obciążeń. Częste nieplanowane odstawienia i uruchomienia do pracy tych turbin a szczególnie uruchamianie w krótkim czasie będą powodować degradację materiałów elementów turbin parowych zmniejszając ich żywotność. Brak kontroli przebiegów zużycia materiałów konstrukcyjnych krytycznych elementów

turbin parowych może być przyczyną niebezpiecznych awarii, groźnych również dla otoczenia. W związku z powyższym uważam, że problematyka pracy doktorskiej p. mgr inż. Martyzny Tomali jest obecnie bardzo aktualna.

#### 1. Wstęp obejmuje trzy podrozdziały

W podrozdziale 1.1 pt. Charakterystyka pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, omówiony został w punkcie 1.1.1 stan obecny struktury systemu produkcji energii elektrycznej w latach 2019 ÷ 2021 przedstawiony został w tabeli 1.1. a na Rys. 1.1 zilustrowano produkcje energii z różnych źródeł w Polsce, Niemczech i Francji w roku 2021. Wykresy na Rys. 1.1.

Różnice w produkcji energii z różnych źródeł w Polsce, Niemczech i Francji ilustrują istotną odmienność polskiego systemu produkcji energii elektrycznej opartego na paliwach kopalnych.

Na wykresie kołowym Rys. 1.2 przedstawiona została wielkość produkcji z różnych źródeł w okresach miesięcznych. Łatwo zauważyć, że w lutym jest większy udział w produkcji energii z węgla kamiennego.

Na Rys. 1.3 w układzie energia elektryczna w funkcji godzin zilustrowana została wielkość produkcji energii z różnych źródeł (węgiel brunatny, węgiel kamienny, gaz, woda, wiatr, OZE (inne niż woda, wiatr) przebiegi dotyczą dnia 12.02.2021 (okres zimy). Natomiast na Rys. 1.4 dotyczą dnia letniego 06.06.2021. Z przebiegu krzywych w obu przypadkach wynika duża zmienność produkcji energii. Przebiegi krzywych na obu rysunkach różnią się.

W tabeli 1.2 zestawiono wartości mocy zainstalowanych i osiągalnych w latach 2019 – 2021. Zauważalny jest ponad dwukrotny wzrost mocy z odnawialnych źródeł energii w system.

W tabeli 1.3 zestawiono pobór i oddanie energii z Polski w latach 2019, 2020, 2021. Wymiana dotyczyła Czech, Litwy, Niemiec, Słowacji, Szwecji, Ukrainy. Łatwo zauważyć, że obecnie tzn. w 2021 r. Pobranie mocy przewyższa oddanie.

W punkcie 1.12 Prognozy rozwoju systemu zapotrzebowania Na Rys. 1.5 przedstawiono wzrost użycia energii elektrycznej w latach 1990 – 2020 i prognozę zużycia energii w latach 2022 – 2035. Na Rys. 1.6 pokazano zapotrzebowanie na moc elektryczną w latach 1990 – 2020 i prognozę zapotrzebowania w latach 2022 – 2035.

Przedstawione prognozy na obu wykresach zależą od przebiegu realizacji wzrostu mocy i energii.

W tabeli 1.4 zestawiono moc osiąganą dotychczas w latach 2005 – 2020 oraz moc prognozowaną jednostek wytwórczych z podziałem na rodzaje jednostek wytwórczych. Z tabeli wynika, że w 2025 mają się pojawić elektrownie gazowe i jądrowe oraz elektrownie wiatrowe morskie.

W tabeli 1.5 przedstawiono deklarowany przyrost lub ubytek mocy osiągalnej między rokiem 2020 i 2035.

Z przedstawionych wartości wynika, że nowo planowane elektrownie i elektrociepłownie nie zastąpią wycofywanych.



Na Rys. 1.7 przedstawiono krzywe prognozowanego zapotrzebowania na moc i mocy osiągalnej przez jednostki wytwórcze przed uwzględnieniem KWD. W przypadku uwzględnienia KWD wartości mocy szybko się obniżają. Z przebiegu wykresu wynika, że istnieje zagrożenie niedoboru mocy już w 2029 r.

W podrozdziale 1.3 pt. Przegląd literatury, Doktorantka omawia wybrane pozycje literaturowe podane w bibliografii rozprawy doktorskiej.

#### 1.4 Cel i zakres podjętych badań

Celem realizowanych w ramach rozprawy prac jest dobór sposobów eksploatacji oraz planowanych badań diagnostycznych turbin bloków 200MW. Przyczyni się to do wzrostu bezpieczeństwa i zmniejszenia ryzyka ich dalszej eksploatacji w okresie (13 – 20 lat) pracy bloków bilansujących niedobory mocy w systemach energetycznych o dużym i stale rosnącym udziale niesterowalnych odnawialnych źródeł energii (OZE).

Cel rozprawy wymaga realizacji niżej wymienionych prac dotyczących:

- określenia charakterystyk obecnej i przyszłej pracy KSE,
- opisanie roli bloków węglowych 200MW w systemie energetycznym, ich parametrów eksploatacyjnych, aktualnego sposobu ich eksploatacji oraz zachodzących zmian,
- zidentyfikowania problemów eksploatacyjnych oraz analiz awaryjności turbin,
- zidentyfikowania obszarów krytycznych turbiny oraz opracowanie metodologii dla oceny skutków zwiększonej elastyczności pracy uwzględniającej prognozowanie rozwoju propagacji pęknięć, zużycia zmęczeniowo-przeciążeniowego oraz związanego z nim ryzyka awarii,
- opracowanie sposobu optymalizacji rozruchów turbin korzystając z algorytmu bieżącej kontroli naprężeń,
- badań laboratoryjnych anizotropii własności materiału dla stali wirnikowej w aspekcie odporności na kruche pękanie,
- określenia optymalnych zakresów i okresów badań diagnostycznych i innych prac związanych z obsługą prewencyjną turbin na podstawie analizy ryzyka,
- opracowania ogólnej strategii dalszej eksploatacji i utrzymania turbin.

## Rozdział 2 Charakterystyka pracy bloków energetycznych

### Podrozdział 2.1 Bloki energetyczne w systemie

Podpunkt 2.1.1. Jednostki wytwórcze centralnie dysponowane. Wymienione w podpunkcie jednostki (JWCD) stanowią główną grupę zespołów produkcyjnych energii centralnie sterowanych. W tabeli 2.1 SPIS JWCD (stan na rok 2021) zamieszczone zostały wszystkie jednostki wytwórcze energii elektrycznej z podaniem mocy osiągalnej i podziałem na jednostki pracujące z wykorzystaniem: węgla kamiennego, brunatnego, gazu ziemnego, wody.

Na Rys. 2.1 przedstawiony w formie wykresu słupkowego czas eksploatacji poszczególnych bloków węglowych klasy 200MW (do końca 2021) a na Rys 2.2 czas eksploatacji pozostałych bloków węglowych do końca 2021.

Podpunkt 2.1.2 Rola turbin parowych w regulacji mocy i częstotliwości sieci elektroenergetycznej. W oparciu o literaturę [39, 40, 41] Doktorantka omawia regulację pierwotną, której przebieg

w układzie współrzędnych  $n(N)$  dla dwóch turbozespołów pracujących na sieć wyizolowaną przedstawiono na Rys. 2.3. W krótkim czasie po zadziałaniu regulacji pierwotnej rozpoczyna się regulacja wtórna.

Graficzna ilustracja regulacji wtórnej dla drugiego z turbozespołów pracujących na sieć wyizolowaną  $n(N)$  przedstawiono na Rys. 2.4.

W przypadku kiedy wahania w sieci trwają dłużej niż 15 minut operatorzy sieci muszą wdrożyć regulację trójną, której działanie nie powinno przekroczyć godziny. Po tym czasie jeżeli występują w dalszym ciągu wahania zachodzi pilna potrzeba uruchomienia dodatkowego bloku.

Podrozdział 2.2 Warunki pracy i trendy ich zmiany.

Podpunkt 2.2.1 Zmienne warunki pracy i praca w stanie quasi – ustalonym

Do zmiennych warunków pracy zalicza się rozruch, odstawienie i zmiana obciążenia. Wymienione warunki powodują dodatkowe obciążenia powierzchniowe, masowe i termiczne. Największe gradienty naprężeń w turbinach parowych występują przy rozruchach. Zależą one od szybkości nagrzewania elementów..

Wystąpienie amplitud naprężeń stanowi cykl w procesie zmęczeniuowym. Liczba cykli powodujących zniszczenie materiałów wynika z wykresu Wöhlera, które są opracowane dla różnych materiałów. Na Rys. 2.5 przedstawiona jest krzywa Wöhlerian z zaznaczonymi obszarami wytrzymałości : I – quasi – statyczne, II – niskocyklicznej, III – wysokocyklicznej. Z przebiegu krzywej wynika, że duże amplitudy naprężeń obszaru I są przyczyną zniszczenia przy mniejszej liczbie cykli. Natomiast III obszar określany jest jako zmęczenie wysokocykliczne charakteryzujące się niskimi amplitudami ale dużą liczbą cykli.

W ustabilizowanych warunkach pracy często pojawia się zjawisko pełzania, które dla turbin parowych stanowi poważne zagrożenie dla ich pracy. Na Rys. 2.6 przedstawiona została krzywa z zaznaczonymi obszarami: I – zmniejszenie prędkości odkształcenia, II – pełzanie z minimalną ustaloną prędkością, III – wzrost prędkości odkształcania.

Bardzo istotnym jest określenie dopuszczalnego czasu pracy materiału konstrukcyjnego turbin parowych w warunkach pełzania. Na Rys. 2.7 w układzie współrzędnych naprężenia w funkcji czasu przedstawiono dwie krzywe określone dla dwóch różnych temperatur metalu. Krzywe te umożliwiają wyznaczenie czasu krytycznego dla danej temperatury.

Inne metody do określenia maksymalnego czasu pracy bazują na maksymalnej wartości odkształcania lub na dopuszczalnej prędkości. Metoda dopuszczalnego odkształcania stosowana jest w kontroli luzów.

Podrozdział 2.2.2 Praca w trybie regulacyjnym. Autorka rozprawy przytacza wyniki, które były przedmiotem badań realizowanych w programie „Bloki 200” nadzorowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Głównymi założeniami dotyczącymi elastycznej pracy bloków były:

- częstsze uruchomienia z różnych stanów cieplnych , również ze stanu zimnego (od 50 do nawet 300 w ciągu roku)
- wzrost nieregularności pracy (kilkudniowe przerwy między rozruchami, skrócenie czasu pracy do 1500 h/rok),



- skrócenie czasu rozruchu (szybsze nagrzewanie i zwiększone tempo naboru mocy do około (9MW/min),
- częstsza praca przy niepełnym obciążeniu, szybkie zrzuty mocy,
- obniżenie minimum technicznego (do 40% mocy nominalnej).

Założenia te zostały poddane krytyce w następujących pozycjach bibliografii. W kolejności przywołań były to pozycje [45, 46, 47, 48, 49, 50, 42, 51].

Recenzent potwierdza uwagi krytyczne zawarte w ww. publikacjach. Powyższe stwierdzenie uzasadnione jest udziałem Recenzenta, który jako pracownik P.B.W. „Hydro-Pomp” sp. z o.o. brał udział w remontach średnich i kapitalnych oraz jako podwykonawca firmy Alstom, EthosEnergy w remontach turbozespołów o mocach 200MW i większych. Uczestniczył również w spotkaniach organizowanych w Politechnice Wrocławskiej dotyczących modernizacji wyżej wymienionych turbin w programie „Bloki 200”.

### 2.3 Aktualne sposoby eksploatacji turbin

#### Punkt 2.3.1 Rozruchy ze stanów zimnych, ciepłych i gorących.

W punkcie 2.3.1 omówione zostały rozruchy ze stanu zimnego, ciepłego i gorącego a na kolejnych rysunkach przedstawione zostały ich graficzne ilustracje.

Na Rys. 2.8 krzywe rozruchowe ze stanu zimnego, dla których na rzędnych odłożone zostały N MW, T °C, p MPa, n obr/min a na odciętych t.

Rys. 2.9 Krzywe procesu stygnięcia metalu i przyrostu temperatury podczas rozruchu,  $T_{po}$  – początkowa temperatura pary,  $T_{mo}$  – początkowa temperatura metalu,

Rys. 2.10 Rzeczywiste krzywe rozruchowe ze stanu ciepłego:

T – temperatura pary świeżej

p – ciśnienie pary świeżej,

N – moc turbiny,

n – prędkość obrotowa.

W rozruchach turbozespołów w skład, których wchodzi część wysokoprężna, część średnioprężna i niskoprężna występują trzy prędkości krytyczne. Przez każdą z nich należy przejść szybko.

Przy rozruchach turbiny należy kontrolować również temperaturę wydłużenia wirnika oraz temperaturę łożysk.

#### 2.3.2 Zmiana mocy i praca z minimalnym obciążeniem

Omówione zostały metody regulacji jakościowej i ilościowej. Na Rys 2.13 przedstawione zostały ilustracje obu regulacji oraz wykres naprężenia w regulacji jakościowej.

Na Rys. 2.14 pokazany został schemat regulacji poślizgowej oraz wykres rozprężenia w regulacji poślizgowej.

Rys 2.15 ilustruje przebieg parametrów procesowych podczas zmiany mocy bloku energetycznego:

T – temperatury, p – ciśnienia pary, M – mocy w funkcji czasu pracy turbiny.

### 3. Awaryjność i problemy eksploatacyjne turbin parowych.

#### 3.1 Awaryjność maszyn i urządzeń oraz jej przyczyny

W podrozdziale 3.1 pt. Awaryjność maszyn i urządzeń, omówione zostały wskaźniki oceny niezawodności bloków energetycznych.

AF – wskaźnik dyspozycyjności, wskaźnik awaryjności FOR, FOF – wskaźnik awaryjności definiowany jako udział czasu awarii w ciągu roku, SOF – wskaźnik remontów planowanych.

Na Rys. 1 ÷ 4 na wykresach słupowych zilustrowano wartość wskaźników AF, FOR, FOF, SOF. Rys. 3.1 Wskaźnik dyspozycyjności (AF) dla krajowych bloków węglowych. Rys. 3.3 Wskaźnik czasu awarii w roku kalendarzowym FOF dla krajowych bloków węglowych. Rys. 3.4 Wskaźnik remontów planowanych SOF dla krajowych bloków węglowych.

W dalszej części podrozdziału 3.1 Doktorantka wymienia również obszary awarii i ich skutki w kotłach, turbinach. Na Rys.3.5 przedstawiona została zależność ilości awarii w funkcji czasu eksploatacji z opisem zdarzeń na obiektach.

Omówione są również inne czynniki związane z eksploatacją turbin np. cechy geometryczne elementów, pierwotny i wtórny stan materiału.

Do elementów krytycznych bloków energetycznych zaliczane są te, których:

- awaria wiąże się z utratą bezpieczeństwa dalszej eksploatacji bloku,
- awaria powoduje długotrwały postój,
- wyprodukowanie wymaga długiego czasu realizacji,
- konieczność wymiany lub naprawa jest kosztowna.

Podkreślona zostaje rola obliczeń numerycznych i metoda elementów skończonych [MES] w określaniu naprężeń oraz przemieszczeń jakie pojawiają się w elementach konstrukcji maszyn i kotłów.

#### 3.2 Uszkodzenia i problemy eksploatacyjne w obrębie turbiny parowej

Najczęstsze przyczyny i skutki uszkodzeń oraz ich lokalizacja zestawione zostały w Tabeli 3.1

##### 3.2.1 Awarie turbozespołów

W punkcie 3.2.1 zestawione zostały przesłanki z pracującej turbiny o możliwości wystąpienia awarii.

Omówione zostały również awarie bloków po stronie elektrycznej i mechanicznej turbiny na potrzeby ciepłownictwa.

##### 3.2.2 Awarie układu olejowego

W punkcie tym podane zostały elementy zabudowane w układzie olejowym, przyczyny awarii układu olejowego oraz kontrola jakości oleju.

### 3.2.3 Osady w układzie przepływowym turbiny

Omówione zostały przyczyny pojawiania się zanieczyszczeń chemicznych, mechanicznych oraz sposoby ich usunięcia. Osady te na łopatkach turbiny powodują obniżenie mocy bloku. Obecnie najczęściej stosowaną metodą (usuwania osadu) czyszczenia układu przepływowego jest mycie pianą z dodatkiem czyszczącym.

## 4. Ocena skutków zwiększonej elastyczności pracy turbin.

Doktorantka we wstępie do dalszych rozdziałów, podrozdziałów i punktów stwierdza, że w otworach centralnych zespołów wirujących turbin parowych akcyjnych mogą występować pęknięcia, które w trakcie eksploatacji turbiny stanowią ogniska propagacji. Pęknięcia w rowkach termicznych będą przyczyną intensyfikacji zużycia zmęczeniowego i pełzanionego. Praca w trybie regulacyjnym może być przyczyną mniejszej żywotności zespołu wirującego turbiny.

### 4.1 Modelowanie propagacji pęknięć

#### 4.4.1 Propagacja pęknięć w warunkach zmęczenia i pełzania

Doktorantka podaje przyczyny powstawania ognisk propagacji oraz czynniki od których zależeć będzie dalsze pęknięcie. Na Rys.4.1 przedstawiona została krzywa prędkości propagacji naprężeń w warunkach zmęczenia w zależności od przyrostu współczynnika intensywności naprężeń. Podane zostały również zależności dotyczące:

- pęknięć obciążanych siłami rozciągającymi (4.3),
- przyrostu współczynnika intensywności naprężeń w przypadku wystąpienia również zmęczenia materiału,
- opisu krzywej przedstawionej na Rys. 4.1 wzorami (4.3), (4.4), (4.5) w układzie współrzędnych a wymiar pęknięcia, N moc i t czas.

Na Rys. 4.2 zilustrowano przebieg propagacji w warunkach naprzemiennego zmęczenia i pełzania materiału. Na Rys 4.3 przedstawiono uproszczony model obszaru wirnika z pęknięciami w otworze centralnym wału turbiny. Podana jest również zależność na bezwymiarową funkcję parametrów geometrycznych pęknięcia.

Na Rys. 4.4 przedstawiono krzywą zmiany parametru M w funkcji wymiaru pęknięcia.

#### 4.1.2 Prawdopodobieństwo zniszczenia na skutek pęknięcia

Uwaga z praktyki Recenzenta. Propagacja pęknięcia zależy od kształtu wady oraz kierunku działania naprężeń. Jeżeli pęknięcie ma kształt rysy wówczas trzeba to pęknięcie szybko usunąć. Jeżeli kierunek działania obciążenia jest wzdłuż pęknięcia, którego jest to faza początku propagacji to można je pozostawić pod warunkiem dalszej kontroli.

#### 4.1.3. Wyniki obliczeń propagacji pęknięć oraz prawdopodobieństwa zniszczenia na skutek pęknięcia



W otworach centralnych wirników turbin parowych akcyjnych przyczynami powstawania wad mogą być:

- koncentracja naprężeń powodująca powstawanie naprężeń obwodowych, które są zdecydowanie większe od naprężeń jakie mogą wystąpić w warunkach bez otworu,
- wady materiałów związane z technologią odlewów.

Na Rys. 4.5 przedstawiono zmiany parametrów wirnika część WP w trakcie rozruchu zimnego. Na rzędnych wykresu umieszczono wartości:  $\alpha$  - najwyższa wartość współczynnika wnikania ciepła, T – najwyższa wartość temperatury pary omywającej, P – najwyższa wartość ciśnienia pary omywającej, n – prędkość obrotowa w funkcji czasu

Na Rys 4.6 i Rys. 4.7 przedstawione zostały rozkłady naprężeń obwodowych podczas rozruchu turbiny odpowiednio w części WP i SP. Na Rys 4.9 i Rys. 4.10 zilustrowano przebiegi naprężeń obwodowych w otworach centralnych pierwszych stopni części WP i SP podczas różnych rozruchów. W oparciu o obliczenia opracowane zostały trzy warianty eksploatacji turbiny.

W wariacie W1 wszystkie rozruchy prowadzone są tak aby naprężenia w otworze dochodziły do 200MPa. W wariacie 3 założono, że wszystkie rozruchy są prowadzone w sposób przyspieszony co powoduje wzrost naprężeń obwodowych w otworach centralnych na poziomie 300 MPa. Wariant W2 stanowi wariant pośredni między W1 i W3.

Na rys. 4.11 i Rys. 4.12 przedstawione zostały rozkłady naprężeń zredukowanych po relaksacji wirników odpowiednio WP i SP. Natomiast na Rys. 4.13 przedstawiony został przebieg naprężeń zredukowanych w warunkach relaksacji w otworach centralnych wirników w funkcji czasu.

W Tabeli 4.2 Zestawione zostały wartości oczekiwane i odchylenia standardowe wielkości wpływających na propagację pęknięć w wirnikach turbiny parowej.

Na Rys. 4.14 w formie wykresów zostały przedstawione wyniki obliczeń propagacji dla wirników części WP i SP dla wszystkich wymiarów pęknięcia. (2 – 5) mm i scenariusza W1.

Następnym analizowanym scenariuszem był W2, w którym połowa rozruchów powoduje wystąpienie naprężeń 300MPa a połowa 200 MPa. Na Rys. 4.15 pokazane zostały wykresy ilustrujące przebiegi pęknięć dla wszystkich wymiarów początkowych zawartych w przedziale (2 – 5) mm.

Przebiegi propagacji dla wariantu W3 zostały zilustrowane dla wirników WP, SP dla tych samych wymiarów początkowych pęknięć co w przypadku W1 i W2.

W Tabeli 4.3 Podane zostały wartości oczekiwane i odchylenia standardowe wielkości wpływających na wymiar krytyczny pęknięcia.

W Tabeli 4.4 Zestawiono wartości oczekiwane , odchylenia standardowe wymiaru krytycznego pęknięcia dla scenariuszy W1, W2, W3.

Na kolejnych Rys. 4.17, Rys. 4.18, Rys. 4.19 przedstawiono wykresy dotyczące prawdopodobieństwa zniszczenia na skutek pęknięcia dla scenariuszy W1, W2, W3 eksploatacji w wirnikach WP i SP ( $K_{Ic} = 100\text{MPa}\sqrt{m}$ ) w funkcji czasu. Na Rys. 4.20, Rys. 4.21, Rys. 4.22 zilustrowane zostały wyniki dotyczące prawdopodobieństwa zniszczenia na skutek pęknięcia dla scenariuszy W1, W2, W3 eksploatacji w wirnika WP i SP dla ( $K_{Ic} = 60\text{MPa}\sqrt{m}$ ).



## 4.2 Modelowanie zużycia zmęczeniowego i pełzaniowego

### 4.2.1. Zużycie zmęczeniowe i pełzaniowe

Wymienione w tytule punktu procesy mają wpływ w wirnikach turbin na propagację występujących pęknięć oraz obniżają parametry wytrzymałościowe metalu prowadzące do uszkodzeń kruchych. W celu określenia dalszej trwałości wirników turbin wykorzystywana jest hipoteza kumulacji uszkodzeń. Autorka rozprawy podaje zależności dotyczące kumulacji zużycia zmęczeniowego, całkowitego zużycia po „N” cyklach zmęczeniowych i t godzinach pracy.

Autorka zamieszcza w pracy również wzór na parametr zużycia  $Z_1$ .

Punkt 4.2.3 Wyniki obliczeń zużycia zmęczeniowego i pełzaniowego oraz prawdopodobieństwo zniszczenia na skutek zużycia.

Miejscom na wale turbiny parowej o zmniejszonej trwałości są rowki termiczne charakteryzujące się małymi promieniami oraz wysoką temperaturą pracy. W obliczeniach zużycia wykorzystano hipotezę liniowej kumulacji.

Na Rys. 4.23 przedstawiono a) układ naprężeń zredukowanych w wirniku WP podczas rozruchu turbiny, b) koncentrację naprężeń zredukowanych w wirniku WP.

Rys. 4.24 ilustruje rozkład naprężeń zredukowanych w wirniku SP podczas rozruchu turbiny oraz koncentrację naprężeń zredukowanych.

Na Rys. 4.25 w układzie współrzędnych naprężenia w funkcji temperatury zilustrowane zostały przebiegi naprężeń zredukowanych w rowku termicznym wirnika WP dla różnych rozruchów a dla części SP na Rys. 4.26.

W Tabeli 4.5 zamieszczone zostały wartości oczekiwane i odchylenia standardowe wielkości wpływających na zużycie zmęczeniowe i pełzaniowe.

Na Rys. 4.27, 4.28, 4.29 przedstawiono wykresy zużycia zmęczeniowo-pełzaniowe wirników WP i SP dla scenariuszy eksploatacji W1, W2, W3. Na Rys.4.30, 4.31, 4.32 w układzie  $P_f$  w funkcji czasu przedstawiono dla różnych warunków eksploatacji W1, W2, W3 prawdopodobieństwa zniszczenia na skutek zużycia zmęczeniowo-pełzaniowego w wirnikach WP i SP.

## 5 Optymalizacja rozruchu turbiny parowej

W paszporcie turbiny parowej producenci maszyny dostarczają charakterystyki rozruchów

W podrozdziale 5.1 Optymalizacja charakterystyki rozruchowej turbiny ze stanu zimnego. Na Rys 5.1 przedstawiona została Fabryczna charakterystyka rozruchowa ze stanu zimnego.

Celem optymalizacji rozruchu może być minimalizacja naprężeń zredukowanych w obszarze ich koncentracji przy zachowaniu czasu rozruchu. Przeprowadzone obliczenia rozruchu wirnika turbiny MES-em wskazały, że maksymalne naprężenia występują w rowku cieplnym uszczelnienia. Na Rys. 5.2 przedstawiono wielkości optymalizowane podczas rozruchu. Są to: szybkość nagrzewania oraz czas nagrzewania. Na Rys. 5.3 przedstawiona została optymalna charakterystyka rozruchowa ze stanu zimnego.

Na Rys.5.4 zilustrowano przebieg naprężeń w wirniku podczas rozruchu realizowanego zgodnie z charakterystyką optymalną.

### 5.2 Przegląd algorytmów bieżącej kontroli naprężeń

W tym podrozdziale omówione zostały algorytmy prezentowane w pozycjach bibliografii rozprawy doktorskiej.

### 5.3 Opis proponowanego algorytmu bieżącej kontroli naprężeń w wirniku

W związku z bardzo szerokimi zakresami zmienności współczynnika wnikania ciepła Doktorantka uważa, że skorzystanie z algorytmów obliczania naprężeń z wykorzystaniem funkcji Greena i całki Duhamela jest niewystarczające. W związku z tym proponuje podzielenie czasu trwania rozruchu na przedziały w zależności od aktualnych wartości realizowanych przez współczynnik ciepła.

Na Rys. 5.7 przedstawiony jest Algorytm wyznaczania naprężeń termicznych. Poza algorytmem do obliczania naprężeń termicznych podana została zależność naprężenia od obrotów (513) od ciśnienia czynnika roboczego (pary)(514), od masy wirującej wirnika. Podana została również zależność określająca wielkość naprężeń zredukowanych.

Dla zwiększenia bezpieczeństwa pracy turbiny Doktorantka proponuje wprowadzenie do algorytmu współczynnika skalującego  $K_s > 1$ . Działanie takie spowoduje zwiększenie wartości naprężenia zredukowanego. Postępowanie takie zabezpiecza przed przekroczeniem wartości dopuszczalnych naprężenia.

### 5.4. Monitorowane obszary turbiny parowej.

Do monitorowania wybierane są elementy o podwyższonym ryzyku wystąpienia zużycia.

#### 5.4.1 Wirnik części wysokoprężnej

Na podstawie wyników obliczeń naprężeń w wirniku części WP metodą MRS symulując rozruch turbiny ze stanu zimnego określono dwa obszary krytyczne:

- obszar I zlokalizowany pod stopniem regulacyjnym zagrożony wystąpieniem propagującego pęknięcia,



- obszar II zlokalizowany w rowku termicznym w turbiny parowej zagrożony zużyciem zmęczeniowo-pełzaniowym.

Monitorowanie naprężeń w ww. obszarach umożliwia opracowanie prognoz przebiegu pęknięć oraz zużycia zmęczeniowo-pełzaniowego bloku w elektrowni w przypadku jego pracy ze zmiennym obciążeniem. Na Rys. 5.8 przedstawiono monitorowane obszary w wirniku części WP turbiny parowej, I obszar otworu odciążeniowego, II miejsce rowka termicznego.

Na Rys. 5.9 przedstawione zostały funkcje wpływu temperatury metalu wirnika WP (obszar I) dla różnych wartości współczynnika wnikania ciepła  $\alpha = 2506 \text{ W/m}^2\text{K}$  i  $\alpha = 2506 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Rys. 5.10 ilustruje przebieg funkcji wpływu dla temperatury wirnika WP (obszar II) dla różnych wartości współczynnika wnikania ciepła.

Łatwo zauważyć, że charakter przebiegu krzywych dla obszaru I i II na Rys. 5.9, Rys. 5.10 jest bardzo zbliżony do siebie. Przebieg funkcji Greena dla składowych normalnych i stycznych naprężeń w wirniku WP (obszar I) dla różnych wartości  $f(x)$ ,  $f(y)$ ,  $f(z)$  i współczynnika wnikania ciepła przedstawiona została na Rys. 5.11.

Na Rys. 5.11 zostały przedstawione funkcje Greena dla składowych normalnych naprężeń w wirniku WP (obszar I).

Na kolejnych Rys 5.12, 5.13, 5.14 przedstawiona została funkcja Greena:

- dla składowych normalnych naprężeń w wirniku WP (obszar I)
- dla składowych stycznych naprężeń w wirniku WP (obszar II).

Natomiast wartości dla stałych związanych z obciążeniem powierzchniowym i masowym wirnika WP dla obszarów I i II zestawione zostały w Tabeli 5.2.

Na Rys. 5.15 przedstawiono krzywe ilustrujące przebiegi naprężeń wyznaczone z algorytmu opartego o funkcje Greena i porównano z wynikami z obliczeń MES.

Przebieg naprężeń w wirniku WP podczas rozruchu zimnego (obszar I) przedstawiony został na Rys. 5.15.

W Tabeli 5.2 zamieszczone zostały wartości dla stałych związanych z obciążeniami powierzchniowymi i masowymi w obszarze I i II wirnika turbiny.

Na Rys. 5.16 przedstawiono krzywe naprężeń w funkcji czasu określone z algorytmu opartego na funkcji Greena i porównano je z naprężeniami obliczonymi Metodą Elementów Skończonych. Krzywe te dotyczyły naprężeń w wirniku WP podczas rozruchu ze stanu zimnego w obszarze II. Przebieg parametrów dla wirnika WP podczas rozruchu ciepłego przedstawiono na Rys. 5.17 w układzie współrzędnych naprężenia  $\alpha \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $T_1$ ,  $p$ ,  $n$  w funkcji czasu  $t$ .

Na Rys. 5.18, 5.19 zilustrowano przebiegi naprężeń w wirniku WP podczas rozruchu ciepłego w obszarze I i II. Porównując przebiegi krzywych dla rozruchu ciepłego na Rys. 5.17, 5.20 gorącego, zauważa się podobieństwo ich kształtu.

Porównując przebiegi krzywych na Rys. 5.21 oraz 5.22 zauważa się zbieżność między wynikami obliczeń z wykorzystaniem funkcji Green'a i metodą elementów skończonych.

Punkt 5.4.2 Wirniki części średnioprężnej (SP)

Podobnie jak w przypadku części WP w ocenie naprężenia w części SP został zastosowany opracowany przez Doktorantkę algorytm. Również jak w części WP wybrano dwa obszary krytyczne (Rys. 5.23):

- obszar I zlokalizowany pod stopniem regulacyjnym narażony na wystąpienie propagującego pęknięcia,
- obszar II zlokalizowany zlokalizowany w rowku termicznym narażony na zużycie zmęczeniowe i pełzaniowe.

Na Rys. 5.23 pokazane zostały monitorowane obszary w wirniku SP turbiny parowej. Opracowana przez Doktorantkę została funkcja aproksymująca wartość współczynnika wnikania ciepła w trakcie rozruchu. Współczynnik może być obliczony z wzoru 5.18. W czasie wzrostu mocy współczynnik wnikania może być określony z wzoru 5.19. W Tabeli 5.3 podane zostały wartości współczynnika  $\alpha_{med}$  i K do obliczania wirnika SP w obszarze I i II.

Na Rys. 5.24, 5.25 przedstawione zostały funkcje wpływu dla temperatury metalu określone dla każdego z obszarów I i II. Kolejne Rys. 5.26 – 5.29 przedstawiają funkcję Green'a dla składowych normalnych i stycznych naprężenia dla obszaru I i II.

W Tabeli 5.4 zestawiono wartości dla stałych związanych z obciążeniem powierzchniowym i masowym dla wirników SP.

Na Rys. 5.30, 5.31 przedstawione zostały przebiegi naprężeń w wirniku SP podczas rozruchu ze stanu zimnego odpowiednio dla obszaru I i II. Kolejnym rozruchem był rozruch ze stanu ciepłego Rys. 5.32 i gorącego Rys. 5.36. Wyniki obliczeń naprężeń za pomocą funkcji Green'a i obliczeń metodą elementów skończonych przedstawiono na Rys, 5.33 i 5.3 obszar wirnika I, Rys. 5.34 i Tys. 5.37 obszar wirnika II.

#### Podpunkt 5.4.3 Kadłub wewnętrzny

Dla określenia rozkładu naprężeń w kadłubie wewnętrznym turbiny wykorzystano metodę elementów skończonych, której wyniki wskazały

Na Rys. 5.39 przedstawiony został rozkład naprężeń zredukowanych w kadłubie wewnętrznym podczas rozruchu zimnego. Wielkość naprężeń zredukowanych nie pokrywa się z miejscami występowania maksymalnych temperatur metali.

Na Rys. 5.40 przedstawiony został monitorowany obszar w kadłubie wewnętrznym.

Rozruch kadłuba wewnętrznego może odbywać się z doprowadzeniem lub bez pary grzejnej do przestrzeni międzykadłubowej.

Na Rys. 5.42 przedstawiono funkcję Green'a dla składowych normalnych naprężenia w kadłubie wewnętrznym.

Na Rys. 5.41 w układzie współrzędnych  $\Delta T_m/K$   $f(t)$  zilustrowano funkcję wpływu dla temperatury metalu kadłuba wewnętrznego.



W Tabeli 5.5 zestawione zostały wartości współczynników przyjęte w obliczeniach kadłuba wewnętrznego dla wariantu I z grzaniem i wariantu II bez grzania.

Na Rys. 5.42 i 5.43 przedstawiono funkcję Green'a odpowiednio dla składowych normalnych naprężeń i dla składowych stycznych naprężenia w kadłubie wewnętrznym.

Natomiast w Tabeli 5.6 zestawione zostały wartości stałych a i b związanych z obciążeniem powierzchniowym dla kadłuba wewnętrznego.

Na Rys. 5.44 porównano wykresy naprężeń wyznaczonych za pomocą MES i funkcji Green'a podczas rozruchu zimnego i z grzaniem. Na kolejnych rysunkach przedstawiono ...Rys. 5.45 przebieg parametrów  $\alpha$ , T, p w funkcji czasu dla kadłuba wewnętrznego podczas rozruchu ciepłego (bez grzania), Rys. 5.46 przebieg naprężeń w kadłubie wewnętrznym podczas rozruchu ciepłego (bez grzania), Rys. 5.47 przebieg naprężeń w kadłubie wewnętrznym podczas rozruchu gorącego (bez grzania).

#### 5.4.4. Zawór odciążający

Procedura badań zaworu odciążającego jest taka jak w przypadku kadłuba wewnętrznego.

#### 5.4.5 Ocena poprawności funkcjonowania algorytmu bieżącej kontroli naprężeń.

Autorka rozprawy wprowadziła zmianę w metodzie obliczeń naprężeń w obszarach kontrolowanych przy użyciu funkcji Green'a. Zmiana ta polegała na możliwości wprowadzenia różnych wartości współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  oraz współczynników korygujących K.

Algorytm dostosowany został do obszarów krytycznych turbiny. Wyniki obliczeń naprężeń zmodyfikowaną metodą porównane zostały z wynikami obliczeń metodą elementów skończonych (MES) oraz Ansys Mechanical. Algorytm został zweryfikowany dla rozruchów ciepłych i gorących. Test wypadł pomyślnie.

### 5.5 Monitorowanie zużycia elementów turbiny w trybie online

#### 5.5.1 Bieżąca kontrola zjawisk degradacji materiału.

Doktorantka uważa, że zmodyfikowany algorytm kontroli naprężeń może być wykorzystany do opracowania systemu monitorowania propagacji pęknięć, zużycia zmęczeniowo-pełzaniowego oraz zliczania ilości cykli zmęczeniowych i amplitud naprężeń w przypadku stanów nieustalonych. W tym celu autorka rozprawy proponuje wykorzystać algorytm kropli deszczu.

#### 5.5.2 Wyniki bieżącej kontroli zjawisk degradacji materiału dla wirnika części wysokoprężnej.

Na Rys. 5.6.1 zilustrowane zostały zmiany wybranych parametrów procesowych podczas eksploatacji rzeczywistej turbiny parowej dla rozruchu zimnego, ciepłego 1, ciepłego 2, gorącego.

Graficzna ilustracja wyników bieżącej kontroli naprężeń dla otworu centralnego, rowków cieplnych w okresach (1 – 4) dla obszarów I, II przedstawiona została na Rys. 5.62.

Na Rys. 5.63 przedstawiony zostały wykresy dotyczące propagacji pęknięć w trybie online obszaru 1 WP dla  $a_0=3$  mm i  $z=0$ .

Na Rys. 5.64 pokazany został przebieg zużycia zmęczeniowo-pełzaniowego w trybie online dla obszaru II wirnika części WP.

## 5.6 Optymalizacja rozruchu turbiny w oparciu o algorytm bieżącej kontroli naprężeń

Opracowany algorytm kontroli naprężeń może być zastosowany dla ograniczenia ryzyka awarii, konsekwencji awarii w danym obszarze, stanu materiału, problemy z przeprowadzeniem naprawy.

### 5.6.1 Opis procesu optymalnego rozruchu wirnika turbiny parowej

Doktorantka omawia również możliwość sprzężenia procesu optymalizacji z algorytmem bieżącego monitorowania naprężeń.

### 5.6.2 Wyniki procesu optymalizacji dla wirnika części wysokoprężnej

W punkcie tym omówiono proces optymalizacji dla obszaru I wirnika części WP.

Na Rys. 5.6.5 przedstawiony został w formie graficznej proces optymalizacji tempa nagrzewania wirnika (obszar I).

Na kolejnych rysunkach przedstawiono:

- Rys. 5.6.6 Przyrost temperatury pary podczas rozruchu dla różnych scenariuszy nagrzewania wirnika WP (obszar I),
- Rys. 5.6.7 Przebieg naprężeń zredukowanych podczas rozruchu zimnego dla różnych scenariuszy nagrzewania wirnika WP (obszar I),
- Rys. 5.6.8 Przyrost temperatury pary podczas rozruchu ciepłego dla różnych scenariuszy nagrzewania wirnika WP (obszar I),
- Rys. 5.6.9 Przebieg naprężeń zredukowanych podczas rozruchu ciepłego dla różnych scenariuszy nagrzewania wirnika WP (obszar I),
- Rys. 5.7.0 Przyrost temperatury pary podczas rozruchu gorącego dla różnych scenariuszy nagrzewania wirnika WP (obszar I).

Na Rys. 5.7.2 przedstawiono przebieg naprężenia termicznego wynikającego po początkowej różnicy temperatur. Omówiony algorytm optymalizacyjny może być wykorzystany w przypadku obszaru II.

Rys. 5.7.3 prezentuje proces optymalizacji tempa nagrzewania wirnika (obszar II).

Rys. 5.7.4 ilustruje przyrost temperatury pary w trakcie rozruchu zimnego dla różnych scenariuszy nagrzewania wirnika WP (obszar II).

Rys. 5.7.5 przedstawia przebiegi naprężeń w obszarze II wirnika wynikające z optymalnych sposobów nagrzewania.

Rys. 5.76 i 5.77 ilustrują wyniki przeprowadzonej optymalizacji dla rozruchu ciepłego.

Rys. 5.78 i 5.79 prezentują otrzymane wyniki optymalizacji: 5.78 – przyrost temperatury, 5.79 – przebieg naprężeń.

W ostatnim akapicie rozdziału 5 Doktorantka omawia zalety opracowanego procesu optymalizacji czasu rozruchu w trybie online.



## Rozdział 6 Charakterystyka gospodarki diagnostyczno-remontowej

### 6.1 Modele obsługi turbin parowych

Doktorantka wspiera się na kilkunastu pozycjach literatury omawia w kilku zdaniach wybrane modele . Celem każdego modelu jest zagwarantowanie dyspozycyjności i minimalizacja strat wynikających z przerw w produkcji energii elektrycznej.

Graficzna ilustracja opisywanych modeli obsługi turbin została przedstawiona na Rys. 6.1.

### 6.2 Badania diagnostyczne turbin parowych

W związku z wymaganą dyspozycyjnością od bloków 200 MW zbudowanych wcześniej, które przepracowały już ponad 200 000 godzin proponuje się realizację remontów i modernizację o nakładach finansowych mniejszych niż budowa nowych obiektów. Założenie takie wymaga jednak przeprowadzenia diagnostyki w zakresie nie tylko ustalenia przyczyn awarii ale również oceny stanu technicznego turbiny. Proponowany zakres prac został przedstawiony na Rys. 6.2. Obejmują one działania zarówno w czasie pracy turbiny jak i w czasie jej postoju.

W podrozdziale 6.2.1 pt. Zastosowanie przyrządów optycznych, Doktorantka omawia zasady działania mikroskopów optycznych oraz elektronowych, sposoby przygotowania próbek do badań mikrostruktury materiału, topografii powierzchni oraz składu chemicznego powierzchni materiałów konstrukcyjnych turbin. Wyniki te wykorzystywane są w ocenie stopnia zużycia materiału konstrukcyjnego łopatek wirników części niskoprężnych turbin parowych.

W ocenie stanu wału z otworami centralnymi wykorzystywane są endoskopy. Endoskopowanie wykorzystuje się również do sprawdzenia wnętrza turbiny przed zabudowa korpusu górnego po remoncie kapitalnym. Do badań nieniszczących , w których korzysta się z mikroskopów zalicza się również metodę replik.

Metoda ta polega na odpowiednim przygotowaniu powierzchni badanego materiału , na który naklejana jest folia , która jest następnie obserwowana pod mikroskopem. Wielkość ziaren struktury jest podstawą oceny stanu materiału. Recenzent wielokrotnie wykonywał takie badania.

#### Podrozdział 6.2.2. pt. Zastosowanie metod magnetycznych

Do badań nieniszczących zaliczana jest również metoda pamięci metalu (MPM). Polega ona na kontroli własnych pól magnetycznych rozproszonych w metalu. MPM korzysta z pamięci dotyczącej obciążenia badanego materiału.

Metoda MPM wykorzystywana jest w badaniach niżej wymienionych elementów konstrukcyjnych turbin parowych:

- otworów centralnych wałów wirników,
- tarcz wieńców łopatek wirników,
- opasek łopatek wirników.

Metodą nieniszczącą wykorzystującą zjawiska magnetyczne jest metoda magnetyczno-proszkowa. Polegająca na naniesieniu na powierzchnię badanego elementu proszku, który w obszarze wady zmienia swój układ.

Do metod nieniszczących zaliczana jest również metoda prądów wirowych, którą można zlokalizować nieciągłości w badanym materiale.

#### Podrozdział 6.2.3 pt. Zastosowanie metody SPT

Z metody tej korzysta się w badaniach własności materiału. Metoda ta polega na tłoczeniu próbki materiału elementu pracującego, którą umieszcza się w komorze badawczej a następnie przetłacza się za pomocą popychacza zakończonego kulką.

W stanowisko do badań metodą SPT wyposażona jest Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej. Schemat stanowiska do badań metodą SPT przedstawiony został na Rys. 6.3. Na Rys. 6.4 przedstawiona została ilustracja oprogramowania stanowiska do badań metodą SPT w Katedrze Maszyn i Urządzeń PŚL. Na Rys. 6.5 przedstawiony został przykładowy wykres zależności przemieszczenia u głowicy niszczącej próbkę materiału w funkcji siły nacisku na próbkę F.

Pomiary wykonano dla kilku stali wykorzystywanych w energetyce. Badano materiały z turbiny już niepracującej eksploatowanej przez 200 000 h, pochodziły z części wlotowej i zimnego końca. Na Rys. 6.6 przedstawione zostały wartości badań próbek udarności metoda Charpy'ego z karbem typu V oraz mikropróbek z gorącej części wirnika i zimnej. Na podstawie wyników badań stwierdzono:

- spadek 0,5% odporności na kruche pękania materiału z obszaru gorącego końca wirnika w stosunku do materiału z zimnego końca.

#### Podrozdział 6.2.4 pt. Rola systemów kontrolnych w diagnostyce turbin

Zadaniem systemów kontroli jest gromadzenie i analizowanie przyczyn nieprawidłowej pracy turbiny. Doktorantka wyróżnia dwie grupy parametrów związanych z warunkami pracy turbiny oraz związanych z zagrożeniem jej awarii.

W Polsce w 2004 roku wprowadzony został system LM System PROPLUS.

W Polsce na wielu znanych Recenzentowi turbinach zostały zabudowane BOTT bloki ograniczeń termicznych turbiny, opracowane przez producenta turbin w Elblągu ALSTOM.

W recenzji pozwalam sobie zamieścić materiał dotyczący BOTT-u oraz zaawansowanego BOTT-u jaki otrzymałem z ALSTOM, z którym P.B.W. „HYDRO-POMP” współpracował w remontach i modernizacjach turbin również o mocy 200MW i większych.

Rozdział 6.3 pt. Badania anizotropii i odporności na kruche pękanie stali wirnikowej w badaniach wykorzystano metodę SPT omawianą w podrozdziale 6.2.3 oraz stanowisko znajdujące się w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej.

Do badań wybrany został materiał zarówno w kierunku obwodowym i promieniowym z tarczy wirnika pierwszego stopnia. Kierunki pobrania próbek stali zostały przedstawione na Rys. 6.7.

Wykonano również badania udarności za pomocą młota Charpy'ego wcześniej przygotowanych próbek promieniowych i obwodowych.

W tabeli 6.2 zestawione zostały wartości pracy łamania i udarności dla zakresu temperatur próbek  $-176 \div 205$  °C.



Na Rys. 6.10 przedstawiono wykres pracy łamania w funkcji temperatury próbek. Z wykresu wynika, że dla próbki obwodowej  $T_{FATT}$  wynosi 97,7 °C a dla promieniowych  $T_{FATT} = 99,2$  °C.

Wykonano również próby tłoczenia metoda SPT. Do badań wybrany został materiał z tej samej tarczy, z której był pobierany do wcześniejszych pomiarów z tą jednak różnicą, że poprzednie próbki były płaskownikami a do badań przeprowadzono na wałkach.

Wyniki badań zostały zestawione w Tabeli 6.3 w zakresie temperatur  $-189,8 \div 19,1$  określona została Energia przetłoczeń.

Z wyników pomiarów wynika, że w przypadku próbek z obwodowego kierunku stali wirnikowej uzyskuje się niższe wartości temperatury przejścia krucho-plastycznego niż w przypadku kierunku promieniowego co świadczy o wyższej odporności na kruche pękanie próbek obwodowych. Różnica między próbkami jest jednak mała co świadczy o tym, że anizotropia własności materiału nie ma istotnego wpływu na propagację pęknięć.

#### 6.4 Utrzymanie prawidłowego stanu technicznego turbiny parowej.

Doktorantka korzystając z publikacji zamieszczonych w bibliografii omawia:

- korzyści z odpowiednio przeprowadzonych działań, wymienia podstawowe pozycje dokumenty jakie są w posiadaniu operatorów turbin parowych.

Podaje również zakresy prac:

- przeglądów technicznych,
- podstawowych rewizji
- przeglądów podstawowych, przeglądów o pełnym zakresie.

Wymienione wyżej zakresy prac często nazywane są jako przegląd, remonty średnie, remonty kapitalne.

Tak są nazywane wymienione zakresy w przypadku współpracy firmy zewnętrznej P.B.W. „HYDRO-POMP” Sp. z o.o. z elektrowniami, cukrowniami, Orlenem, Lotosem itp.

#### Rozdział 7 pt. Opracowanie ogólnej strategii eksploatacji i obsługi opartej o analizę ryzyka

Istotnym elementem w rozdziale 7 są opracowane algorytmy:

Rys. 7.9 Proponowany algorytm tworzenia strategii eksploatacji i obsługi obiektów energetycznych,

Rys. 7.13 Algorytm tworzenia strategii eksploatacji i obsługi turbiny parowej  $a_0=3$  mm,  $z_0=0$ ,  $t=13$  lat,

Rys. 7.16 Algorytm tworzenia strategii eksploatacji i obsługi turbiny parowej  $a_0=3$  mm,  $z_0=0.5$ ,  $t=13$  lat,

Rys. 7.18 Algorytm tworzenia strategii eksploatacji i obsługi turbiny parowej  $a_0=3$  mm,  $z_0=0$ ,  $t=20$  lat,

Rys. 7.20 Algorytm tworzenia strategii eksploatacji i obsługi turbiny parowej  $a_0=3$  mm,  $z_0=0.5$ ,  $t=20$  lat,



## Rozdział 8 pt. Podsumowanie i wnioski

Autorka rozprawy w podsumowaniu stwierdza, że głównym celem pracy doktorskiej jest dobór sposobów eksploatacji oraz planowania badań diagnostycznych turbin klasy 200 MW. Przyczyni się to do zwiększenia bezpieczeństwa i obniżenia ryzyka ich dalszej eksploatacji. W perspektywie kilkunastu lat pracy bloków jako źródeł ryzyka bilansujących niedobory mocy w systemach energetycznych o dużym i ciągle rosnącym udziale niesterowalnych źródeł odnawialnych.

Zakres podjętych badań dla realizacji ww. celu rozprawy doktorskiej obejmuje 8 punktów wymienionych w podrozdziale 1.4 Cel i zakres podjętych badań.

W oparciu o wyniki badań w tym i obliczeń numerycznych Autorka rozprawy formułuje 11 wniosków. Podkreśla również, że wyniki niektórych badań znalazły już zastosowanie w praktyce w zakresie udoskonalania eksploatacji bloków energetycznych.

Podsumowując rozprawę doktorską mgr inż. Martyny Tomali stwierdzam, że jest napisana bardzo starannie a jej przejrzysta struktura pomaga czytelnikowi w poruszaniu się wśród bogatej tematyki omawianych zagadnień. Ponadto bogata ilustracja otrzymanych wyników w formie tabel i wykresów stanowi także o wysokiej jakości rozprawy doktorskiej.

### Wniosek końcowy

Treść rozprawy dowodzi, że Doktorantka bardzo dobrze orientuje się w przedstawianej tematyce.

Nie stwierdzam w tym zakresie żadnych uchybień i oceniam znajomość przedmiotu rozprawy przez Doktorantkę w tym Jej przygotowanie zawodowe i naukowe bardzo pozytywnie.

W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania jakie stawia rozprawom Ustawa o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki.

Wobec tego wnioskuję o jej przyjęcie jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Uzasadnienie wniosku o wyróżnienie pracy.

Uważam, że opracowane i zamieszczone w rozprawie przez Doktorantkę algorytmy są podstawowymi elementami realizacji celu pracy doktorskiej, stanowią one nową wiedzę w obszarze eksploatacji turbin parowych o mocy 200 MW będących źródłami bilansującymi niedobory w systemie energetycznym.

Doktorantka w ostatnim zdaniu rozdziału 8 informuje, że „wyniki niektórych badań znalazły zastosowanie w praktyce z zakresu udoskonalenia eksploatacji bloków energetycznych”.

Recenzent będący pracownikiem P.B.W. „HYDRO-POMP” Sp. z o.o. realizującej remonty turbin parowych potwierdza ww. informację.

