



Politechnika  
Śląska

Politechnika Śląska w Gliwicach  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

**Dyscyplina naukowa:  
Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka**

**DOBÓR SPOSOBÓW EKSPLOATACJI ORAZ PLANOWANIE  
BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH ELEMENTÓW TURBIN  
PRACUJĄCYCH W ELASTYCZNYCH WARUNKACH  
PRACY W OPARCIU O ANALIZĘ RYZYKA**

mgr inż. Martyna Tomala

Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Rusin  
Promotor pomocniczy: dr inż. Adam Wojaczek

Gliwice, 2022

# **Dobór sposobów eksploatacji oraz planowanie badań diagnostycznych elementów turbin pracujących w elastycznych warunkach pracy w oparciu o analizę ryzyka**

**Autor: mgr inż. Martyna Tomala**

**Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Rusin**

**Promotor pomocniczy: dr inż. Adam Wojaczek**

## **STRESZCZENIE**

Ze względu na konieczność transformacji polskiego systemu energetycznego obserwuje się zmianę sposobu wykorzystania długo eksploatowanych bloków węglowych. Coraz większa ilość źródeł odnawialnych charakteryzujących się niskimi wartościami współczynników dyspozycyjności oraz ich pierwszeństwo w dostępie do sieci sprawia, że istniejące jednostki klasy 200 MW zmuszone są do dostosowania generacji energii do aktualnego zapotrzebowania. Zmienia się zatem ich reżim eksploatacji w kierunku trybu regulacyjnego charakteryzującego się dużą cyklicznością. Jednym z elementów krytycznych bloku węglowego jest turbina parowa, dla której wzrost elastyczności pracy prowadzi do intensyfikacji procesów degradacji materiału, a w konsekwencji do poważnych awarii. W pracy doktorskiej podjęto próbę doboru warunków eksploatacji i planowania badań diagnostycznych dla poszczególnych elementów turbin tak, aby zapewnić bezpieczeństwo dalszego funkcjonowania oraz utrzymać produkcję energii do czasu rozwoju nowych źródeł.

Skutkami pracy turbin parowych w trybie regulacyjnym jest wzrost tempa propagacji pęknięć oraz rozwój zużycia zmęczeniowo-pełzaniowego. Aby dokonać oceny skutków elastycznej eksploatacji przeprowadzono obliczenia propagacji pęknięć w otworze centralnym wirników oraz utraty trwałości powodowanej zużyciem zmęczeniowo-pełzaniowego w rowkach cieplnych. Aby uwzględnić losowy charakter zjawisk zastosowano metodę Monte Carlo. Na podstawie uzyskanych wyników dokonano oszacowania prawdopodobieństwa zniszczenia w zakładanym okresie wynoszącym 13 lub 20 lat.

Zarówno propagacja pęknięć jak i wzrost zużycia są silnie zależne od poziomu naprężenia w wirniku podczas stanów nieustalonych, zwłaszcza rozruchów. Z tego względu, aby zapewnić równocześnie wymogi związane ze wzrostem elastyczności pracy jednostki, jak i bezpieczeństwem eksploatacji, proces nagrzewania powinien być optymalizowany. Statyczna optymalizacja rozruchu polega na modyfikacji istniejących charakterystyk rozruchowych. Dynamiczna z kolei polega na doborze przyrostu temperatury pary w czasie rzeczywistym z równoczesnym monitorowaniem poziomu naprężenia. Na potrzeby opracowania systemu dynamicznej optymalizacji rozruchu turbiny opracowano algorytm bieżącej kontroli naprężeń dla elementów krytycznych, do których należały wirniki części wysoko i średnioprężnej, kadłub wewnętrzny oraz zawór odcinający. Zaproponowano zastosowanie koncepcji temperatury modyfikowanej pary oraz dedykowanego współczynnika korygującego, które pozwalają na uwzględnienie w obliczeniach zmienności współczynnika wnikania ciepła. Dzięki temu algorytm oparty na funkcjach Green'a pozwala na wyznaczenie

naprężeń podczas eksploatacji turbiny w czasie rzeczywistym, szczególnie w okresie trwania stanów nieustalonych. Uzyskano zadowalającą zgodność wyników analitycznych z metodą elementów skończonych oraz uniwersalność działania dla różnych typów rozruchów. System bieżącej kontroli naprężeń może zostać również wykorzystywana do ciągłego śledzenia poziomu zużycia poszczególnych elementów, poprzez wykorzystanie algorytmu kropli deszczu do zliczania cykli zmęzeniowych oraz parametru Larsona-Millera do określenia trwałości pełzaniowej, a następnie jej ubytku.

Ze względu na podwyższone ryzyko awarii związanej z propagacją pęknięć w wirnikach turbiny, przeprowadzono badania anizotropii własności stali wirnikowej pod kątem temperatury przejścia krucho-plastycznego oraz odporności na kruche pękanie. Próbki materiału pochodziły z tarczy stopnia regulacyjnego wycofanego z eksploatacji wirnika części wysokoprężnej. Wykonano próbę udarności metali metodą Charpy'ego oraz mikropróbę tłoczenia (SPT) dla materiału pobranego w kierunkach promieniowym i obwodowym. Otrzymane wyniki wskazują na lepsze własności dla próbek obwodowych, jednak różnice są na tyle małe, że nie stwierdzono istotnej anizotropii.

Do określenia optymalnego czasu przeprowadzenia działań prewencyjnych, polegających na wykonaniu badań diagnostycznych oraz naprawy korekcyjnej zaproponowano wykorzystanie wskaźnika NPV. We wskaźniku uwzględniono koszty obsługi prewencyjnej, uniknięte dzięki niej ryzyko awarii turbiny oraz ryzyko awarii przed i po przeprowadzeniu naprawy.

Podsumowaniem badań było stworzenie strategii dalszej eksploatacji i obsługi dla poszczególnych elementów krytycznych w obiektach energetycznych. Szczegółową analizę przeprowadzono dla wirnika części wysokoprężnej turbiny. Dla założonego scenariusza dalszej pracy bloku energetycznego, dobrano dopuszczalne wartości naprężeń podczas rozruchów, zapewniające utrzymanie niskiego poziomu ryzyka w okresie kolejnych 13 lat. Dla dłuższego okresu 20 lat, zaproponowano wykorzystanie wskaźnika NPV w celu wyznaczenia korzystnego czasu przeprowadzenia działań prewencyjnych. Do zapewnienia wymaganego poziomu naprężenia wykorzystano proces optymalizacji nagrzewania, który pełnił rolę systemu sterowania naprężeniami równocześnie dla dwóch obszarów zagrożonych (otworu centralnego i rowka termicznego).