

Streszczenie

Tytuł rozprawy: *Przepływowo-dynamiczna modernizacja łopatki wirnikowej turbiny parowej*

W niniejszej rozprawie przedstawione zostały zagadnienia związane z problematyką projektowania łopatek turbin parowych. Skupiono się na zaproponowaniu nowego rozwiązania dla wylotów części średnioprężnej turbin 13K215 – łopatki o długości profilu 500 mm. Projektowana łopatka będzie miała również zastosowanie w pozostałych turbinach z rodziny 200MW takich jak 13K200 czy 13K210. W ostatnich dwudziestu/trzydziestu latach, większość producentów turbin parowych koncentrowała się na ulepszaniu tej rodziny turbozespołów głównie poprzez modernizację części niskoprężnej a dla części średnioprężnej stosowano standardowe rozwiązania.

W pracy został przedstawiony opis kolejnych modernizacji przeprowadzanych na turbinach 13K215. W wyniku wstępnych analiz pokazano, że poprawienie sprawności i zwiększenie wysokości łopatki ostatniego stopnia w tej lokalizacji przyniesie wymierne zyski w postaci podwyższonej mocy generowanej przez turbinę. Z uwagi na aktualną sytuację polityczną i ekologiczną, wysokosprawny produkt zmniejszający jednostkowe zużycie ciepła w procesie produkcji energii elektrycznej będzie pożądanym i pozytywnie wpłynie na środowisko naturalne.

Z projektowaniem tego typu elementów wiąże się szereg problemów i wymagań do spełnienia. W niniejszej rozprawie opisano problematykę w oparciu o dostępną literaturę m.in. mechanizmy powstawania sił działających na łopatkę czy podstawy metod projektowania zostały zaprezentowane w niniejszej rozprawie. Łopatka ostatniego stopnia części SP pracuje w wyższych niż łopatki NP parametrach (temperatura, ciśnienie), co za tym idzie profile są bardziej obciążone. W pracy opisane zostały dotychczasowe doświadczenia firmy GE Power w zakresie modernizacji ostatniego stopnia części średnioprężnej. Pokazały one sens rozwijania tego produktu oraz newralgiczne punkty konstrukcji. W pierwszej kolejności opisane zostały aspekty wytrzymałościowe, ponieważ z nimi wiązały się największe problemy dla tego typu produktu (pracującego w tych konkretnych warunkach).

Do osiągnięcia celu niniejszej rozprawy konieczne było przedstawienie wymagań projektowych z uwzględnieniem analiz przepływowych. W pracy przedstawiono opisane w literaturze metody wstępnego projektowania układów łopatkowych oraz analizowania ich sprawności. Przedstawione zostały straty występujące w stopniu turbinowym oraz geneza ich powstawania.

Kolejnym zagadnieniem rozważanym przy rozwiązywaniu przedstawianego problemu było określenie wszystkich ograniczeń determinujących kierunki możliwego rozwoju łopatek zlokalizowanych w tej części turbiny. Zwrócono uwagę na to, aby polepszając jeden element turbiny nie pogorszyć pozostałych np. poprzez wprowadzenie do układu łopatkowego zbyt długiej łopatki ostatniego stopnia nie spowodować problemów mechanicznych, montażowych lub przepływowych w kanale wylotowym z modułu. W tym celu przeanalizowano geometrię elementów stacjonarnych oraz wirnika, lokalizacje interfejsów i określono maksymalną możliwą wysokość nowoprojektowanej łopatki. Skupiono się także na tym, aby znaleźć rozwiązanie dla problemu integralności wieńca wirnikowego (bazując na poprzednich doświadczeniach firmy). Kolejne analizowane propozycje konstrukcji bandaża zostały przedstawione i omówiono ich zasady wykonania i montażu. Element ten odgrywa bardzo ważną rolę w tego typu łopatkach ze względu na to, że inne rozwiązania pozwalające utrzymanie integralności wieńca i tłumienie drgań własnych pojedynczej łopatki (np. druty tłumiące), zostały odrzucone ze względu na wprowadzanie strat obniżających sprawność końcową stopnia.

Znając parametry geometryczne przedstawiony został model do obliczeń przepływowych. Składał się on z dwóch łopatek, gdyż, aby uzyskać odpowiedni kąt napływu na nowoprojektowane pióro łopatki wirnikowej należało przygotować model łopatki kierowniczej. Oprócz samego kąta napływu dało to możliwość wprowadzenie bardziej zbliżonych do rzeczywistości warunków przepływowych takich jak np. zaburzenia ciśnienia i prędkości spowodowane efektem krawędzi spływu. W niniejszej rozprawie pokazano na jakie aspekty należy zwrócić uwagę, aby prawidłowo ocenić zaprojektowane pióro łopatki. Pokazano wykresy obciążenia profilu przed i po przeprowadzonej modernizacji. Za pomocą izo-powierzchni zdefiniowanej przez ujemne prędkości pary w kierunku osiowym zlokalizowano miejsca, w których wystąpiły oderwania strugi od powierzchni łopatki lub lokalne wiry. Bazując na parametrach termodynamicznych przed i za wieńcem wirnikowym w projektowanych dotychczas układach łopatkowych dla retrofitów turbin 13K215, dobrano liczbę łopatek wirnikowych. Początkowo założono 90 łopatek wirnikowych, ale po przeprowadzeniu obliczeń przyjęto 87 łopatek. W kolejnym etapie wprowadzono korekty w górnej części pióra, które opierały się na modyfikacji zarysu przedniej części strony ciśnieniowej i grzbietu łopatki (strona ssąca). W ostatnim etapie wykonana została analiza uwzględniająca przecieki nad bandażowe. Miało to na celu obliczenie rzeczywistej sprawności końcowej i mocy generowanej przez nową łopatkę wirnikową. Zyski płynące z modernizacji okazały się realne do osiągnięcia. Sprawność została wyliczona na poziomie 94,28% i przy końcowych parametrach łopatki generowana moc z wieńca powinna zwiększyć się o 803,53 kW względem łopatki o długości 400 mm przed modernizacją. Przyrost mocy turbiny wyniesie około 0,45 MW.

W kolejnym etapie zbudowano model obliczeniowy dla analiz wytrzymałościowych. Przedstawione zostały możliwe rozwiązania dla każdego z projektowanych elementów łopatk, od strony wytrzymałościowej, obróbczej i montażowej. Wybrany został typ stopki oraz przedstawiono uzasadnienie takiego rozwiązania. Łopaska wirnikowa turbiny parowej jest newralgicznym elementem z punktu widzenia niezawodności pracy całego turbozespołu, więc niezbędne było przestrzeganie wymagań stosowanych dla tego rodzaju podzespołu. W wyniku przeglądu dostępnych instrukcji i zaleceń nie znaleziono informacji dotyczącej takich wymagań dla łopaski ostatniego stopnia części średnioprężnej. Spowodowane było to tym, dotychczas skupiano się na rozwoju części NP. Niemniej jednak takie wytyczne były bazą do sporządzenia szeregu kryteriów dla łopaski krótszej niż te z wylotu części niskoprężnej, ale pracującej w wyższych temperaturach i ciśnieniach. Zostały ustanowione nowe limity. Na tym etapie pokazany został proces budowania modelu obliczeniowego, dyskretyzacji oraz założeń do ustalenia warunków brzegowych. Obciążenie profilu od przepływającej pary zostało otrzymane z analizy CFD. Pokazana została metoda zredukowania modelu obliczeniowego do jednej łopaski i wykorzystania cyklicznej symetrii, co znacznie skróciło czas obliczeń. Dla wariantu ze stopką palczastą kołkowaną, zbudowano model złożony z dwóch łopatek i sektora tarczy.

Wykonano szereg analiz, dla kolejnych rozważanych rozwiązań konstrukcyjnych. Punktem odniesienia były obliczenia dla łopaski wyposażonej w prosty bandaż, nieposiadający żadnego dodatkowego elementu między sąsiadującymi ze sobą elementami. Dla wszystkich przypadków przedstawiono największe naprężenia główne w konkretnych lokalizacjach. Rozważono 3 różne przypadki dla stopek łopaski: jodełkową skośną, jodełkową prowadzoną po łuku oraz palczastą kołkowaną (rozwiązanie OEM). Ostatnie z nich miało na celu sprawdzenie możliwości usprawnienia turbin 13K200 i 13K215, które nie zostały poddane jeszcze modernizacji części SP, poprzez wymianę jedynie ostatniego stopnia modułu średnioprężnego. Zarówno wariant III (ze stopką palczastą kołkowaną) jak i pozostałe dwa (ze stopką jodełkową prowadzoną po łuku i prostą) dały pozytywne rezultaty tzn. spełniły postawione kryteria. Dla stopek jodełkowych konieczne było wykonanie dodatkowych obliczeń przy uwzględnieniu pełzania, ponieważ naprężenia przy powierzchniach styku były zbyt wysokie i należało sprawdzić czy zaczepy wrębu nie ulegną zniszczeniu. W przypadku rozpatrywanych rozwiązań dla bandaża najlepsze wyniki otrzymano stosując integralny kołek eliptyczny. Oprócz różnicy przemieszczeń między bandażami sąsiednich łopatek na maksymalnym poziomie 0,05mm dało ono najniższe wartości naprężeń głównych, w żadnej lokalizacji nieprzekraczających wymaganych kryteriów. Opisano wady i zalety oraz pokazano problematyczne lokalizacje naprężeń dla poszczególnych rozwiązań.

Każdy stopień łopaskowy musi spełniać także kryteria częstotliwościowe celem uniknięcia rezonansu. Sporządzono wykresy interferencyjne dla najlepszego rozwiązania bandaża oraz dwóch

typów stopek łopatkowych, na których pokazano częstotliwości drgań pierwszych pięciu grup postaci drgań własnych ułopatkowanej tarczy, linie wymuszenia od prędkości obrotowej oraz punkt wskazujący częstotliwość definiowaną przez łopatki kierownicze. Stwierdzono, że w pierwszej grupie częstotliwości drgań ułopatkowanej tarczy linia wymuszenia przecina postacie poniżej 8 średnicy węzłowej i z tego powodu konieczne było przeprowadzenie sprawdzenia naprężeń modalnych dla 4 średnicy węzłowej.

W ostatnim etapie przeprowadzono obliczenia niskocyklowego zmęczenia. Zdefiniowano gradienty przyrostu i spadku temperatury, ciśnienia i prędkości w określonych fazach cyklu. Za pomocą określonych liczby cykli pracy stwierdzono jakie komponenty są w stanie przepracować bez wystąpienia uszkodzenia. Limitem zazwyczaj stosowanym jest minimum 5000 cykli dla nowoprojektowanej łopatki, ale przyjęto bardziej konserwatywne podejście i przyjęto 10000 cykli. Wyniki dla wirnika i wrębu wyniosły 14242 cykli a dla samej łopatki i pozostałych elementów 189410 cykli.

W końcowym etapie wybrano rozwiązanie dla bandaża – rozwiązanie z integralnym kołkiem eliptycznym oraz dwa rozwiązania dla stopek łopatki. Podkreślono, że wariant jodełki skośnej powinien być stosowany w przyszłych modernizacjach części SP ze względu na koszty i pracochłonność wykonania oraz na łatwość wykonywania prac serwisowych. Drugi z wariantów mógłby być stosowany przy pracach w celu zwiększenia sprawności turbiny, ograniczonych do wymiany jednego stopnia części średnioprężnych turbin 13K200 i 13K215. W pracy pokazano, że jest możliwe wykonanie łopatki o długości 500mm, dłuższej niż dotychczasowa 444mm.

Pełna weryfikacja zaprojektowanej łopatki odbywa się dopiero po wykonaniu testów na odwirowni. Kolejnym etapem jest sprawdzenie rozwiązania dla opisanych wcześniej małych zakresów serwisowych turbin OEM. Łopatka ostatniego stopnia w tym przypadku jest zainstalowana na mniejszej średnicy, więc konieczne będzie sprawdzenie i ewentualne poprawienie kształtu pióra łopatki wirnikowej. Po stwierdzeniu możliwości zainstalowania łopatki ostatniego stopnia o długości 500mm i stwierdzeniu przyrostu mocy, w kolejnych etapach modernizacji należy uwzględnić łopatkę kierowniczą oraz stopień poprzedzający LSB.