dr hab. inż. Piotr Lampart, prof. nadzw. IMP PAN
Kierownik Ośrodka Energetyki Cieplnej
Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN
ul. J. Fiszera 14, 80-952 Gdańsk

Gdańsk 12.05.2022

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Milewskiej wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Gdańskiej (pismo 136/WIMiO/2022 z dn. 13.04.2022)

1. Wstęp

Przedstawiona do opinii rozprawa doktorska mgr inż. Anny Milewskiej pt. „Metoda neuronowego wyznaczania przestrzennych pól przepływów w przydźwiękowych i naddźwiękowych kanałach łopatkowych turbin parowych" została wykonana na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej pod kierunkiem dr. hab. inż. Jerzego Głucha, prof. PG. Praca zawiera streszczenia w języku polskim oraz angielskim, podziękowania, spis oznaczeń i skrótów, spis treści, 6 rozdziałów, spis literatury (71 pozycji), cztery załączniki, zestawienie rysunków oraz tabel. Rozprawa liczy 92 strony.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Diagnostyka cieplno-przepływowa odgrywa istotne znaczenie w trakcie eksploatacji złożonych obiektów energetycznych jakimi są bloki parowe. Pozwala na określenie przyczyn pogarszającej się sprawności bloków, do których można zaliczyć np. degradację powierzchni wymiany ciepła, degradację uszczelnień, krawędzi łopatek i innych elementów układu przepływowego. Umożliwia zaplanowanie konkretnych działań w celu przywrócenia warunków pracy do stanu referencyjnego. W programie DIAGAR służącym do diagnostyki bloków parowych w czasie rzeczywistym wykorzystuje się sieci neuronowe – przybliżone modele matematyczne pracy obiegu parowego oparte na szerokiej bazie danych pochodzących głównie z obliczeń termodynamicznych obiegu, w połączeniu z weryfikacją eksperymentalną danych na rzeczywistym obiekcie.

Celem przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej jest opracowanie symulatora neuronowego układu przepływowego grupy dwóch stopni części niskoprężnej turbiny o mocy 370MW, który znalazłby zastosowanie w programie diagnostycznym DIAGAR. Praca wpisuje się w aktualny nurt badań prowadzonych w wiodących placówkach naukowych w kraju i na świecie.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do rozprawy. Autorka omawia podstawowe zadania diagnostyki cieplno-przepływowej bloków energetycznych na przykładzie programu DIAGAR i dokonuje przeglądu prac związanych z zastosowaniem sieci neuronowych w programach diagnostycznych. W rozdziale 2 przedstawiono motywacje i cel oraz zakres pracy. Grupa stopni wylotowych cz. NP turbiny odgrywa duże znaczenie w produkcji mocy i charakteryzuje się złożonym obrazem przepływu pary, na który składają się znaczne gradienty parametrów przepływu wzdłuż wysokości kanału, oddziaływanie przepływów wtórnych i strumieni

ubocznych, w tym przecieku nadłopatkowego, obszary oderwań, fale uderzeniowe, przepływ i kondensacja pary mokrej z oddziaływaniem kropel wody. Opracowanie przybliżonego modelu przepływu w grupie stopni wylotowych w postaci symulatora neuronowego pozwoliłoby na znaczne rozszerzenie funkcji diagnostycznych programu DIAGAR. W zakres pracy wchodzi m.in. budowa modelu numerycznego i analiza otrzymanych rezultatów, stworzenie bazy danych referencyjnych, opracowanie symulatora neuronowego przepływu na średnicy podziałowej i w przestrzeni 3D. Rozdziały 1-2 są zredagowane poprawnie. W przyszłych pracach publikacyjnych sugerowałbym jednak unikanie odwołań do zbyt wielu prac w jednym miejscu ([ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], ...).

W rozdziale 3 przedstawiono model obliczeniowy przepływu 3D oraz wyniki obliczeń. Autorka swobodnie posługuje się programem komercyjnym. Wykorzystuje układ równań RANS z modelem turbulencji k-ω SST i modelem czynnika roboczego na bazie tablic własności pary wodnej i wody IAPWS IF97, dostępne w kodzie komercyjnym Ansys CFX. Autorka definiuje warunki brzegowe w tym rozdziale na podstawie pomiarów na obiekcie rzeczywistym. Ważny element przygotowania do analizy rezultatów stanowi badanie niezależności rozwiązań od rozmiaru siatki obliczeniowej. Wyniki obliczeń pokazują zmienność parametrów przepływu wzdłuż wysokości łopatki, który można określić jako efekt gradientu reakcyjności wzdłuż wysokości łopatki wywołany ograniczeniami geometrycznymi kanału przepływowego (jednostronnie rozszerzający się kanał) w warunkach zwiększającej się objętości właściwej pary.

Lektura rozdziału 3 pozostawia jednak pewien niedosyt informacyjny. Cały rozdział jest zredagowany zbyt lakonicznie, z pominięciem szeregu informacji istotnych dla procesu obliczeniowego i analizy otrzymanych rezultatów.

- Tytuł rozdziału brzmi niefortunnie i stanowi zbyt duży skrót myślowy. Model obliczeniowy jest numeryczny, tylko wykorzystuje warunki brzegowe w postaci danych pomiarowych.
- Wzmianka na temat modelu matematycznego pojawia się dopiero na str. 24, choć wyniki obliczeń prezentowane są już wcześniej. Brakuje informacji na temat zastosowanego schematu numerycznego.
- Brakuje także informacji, czy modelowano obszar przecieku nadłopatkowego.
- W jaki sposób traktowano wzajemnie ruchome obszary, czy zastosowano warunki brzegowe typu „sliding mesh", „mixing plane" lub „frozen rotor"? Brakuje też informacji czy mamy do czynienia z rozwiązaniem przepływu stacjonarnego, quasi-niestacjonarnego, czy niestacjonarnego.
- Zastosowanie modelu turbulencji k-ω SST nakłada pewne wymagania na zgęszczenie siatki w obszarze warstwy przyściennej. Wartość y^+ jaką należy zastosować to 2-3, tak aby w podwarstwie lepkiej umieścić co najmniej dwie komórki. Z przedstawionych informacji wynika, że wymagania te mogą być spełnione na większej części powierzchni łopatek i ograniczeń kanału. Wartości maksymalne y^+ na rys. 3.10 nie są miarodajne, gdyż prawdopodobnie dotyczą znikomej części powierzchni, tak więc ich publikacja może być myląca.
- Schemat obiegu cieplnego na rys. 3.2 jest niekompatybilny z rysunkiem w załączniku 1 w obszarze części SP.
- Brakuje definicji sprawności przepływowej.

Rozdział 4 poświęcony jest budowie symulatora numerycznego. W pierwszej kolejności Autorka przygotowała bazę obliczeń referencyjnych. Obliczenia CFD prowadzono w szerokim zakresie obciążeń, w ramach obszaru pracy turbiny. Zestaw warunków brzegowych do

obliczeń CFD pozyskano z obliczeń termodynamicznych obiegu cieplnego turbiny dla zadanych punktów pracy. Dokonano wyboru zbioru treningowego, walidacyjnego i testowego. Przed przystąpieniem do stworzenia symulatora neuronowego, przeprowadzono testy kilku metod uczenia maszynowego. Ostatecznie wybrano model XGBRegressor jako najbardziej optymalny pod względem czasu operacji i wartości współczynnika determinacji, na bazie którego zbudowano symulator neuronowy przepływu pary w grupie stopni cz. NP turbiny.

Po serii obliczeń optymalizacyjnych, przyjęto strukturę sieci neuronowej w postaci perceptronu wielowarstwowego z trzema warstwami ukrytymi o liczbie neuronów 256/512/1024. Zbudowany symulator neuronowy przepływu na średnicy podziałowej charakteryzuje się wartością współczynnika determinacji na poziomie 0.9847 (przy założonej liczebności podzbioru danych uczących 1024 i liczbie epok 200). Najniższą dokładność przybliżenia otrzymuje się w obszarze krawędzi wylotowej łopatki wirnikowej ostatniego stopnia oraz dla rozkładu liczby Macha. Z kolei zbudowany symulator neuronowy przepływu 3D charakteryzuje się wartością współczynnika determinacji na poziomie 0.98 (przy założonej liczbie epok 50).

W dotychczasowych rozważaniach symulator neuronowy budowano dla rozkładów trzech parametrów cieplno-przepływowych – ciśnienia, temperatury i liczby Macha. W końcowej części rozdziału 4 analizę rozszerzono o czwarty parametr w postaci rozkładu entropii statycznej. Dodano czwarty neuron w warstwie wyjściowej. W efekcie uzyskano poprawę predykcji symulatora neuronowego przestrzennego (R^2=0.985), wydaje się z uwagi na fakt, że miejsca wzrostu entropii statycznej związane są z obszarami największych gradientów parametrów przepływu i strat entalpowych. Rozdział 4 jest zredagowany w zasadzie poprawnie.

- Pewne uwagi można mieć do prezentacji danych w Tab. 4.1, tylko jako warunku brzegowego do obliczeń CFD. Wartościowe byłoby krótkie opisanie sposobu regulacji mocy oraz dołączenie takich danych z bilansu obiegu jak natężenie przepływu i moc badanej grupy stopni, podstawowe parametry i moce części WP, SP i NP, które rzuciłyby światło na praktyczną realizację poszczególnych zadanych punktów pracy turbiny.
- Na rysunkach w tym rozdziale widnieją jednocześnie terminy polskie i angielskie, czego nie należy praktykować.
- Załączniki 2 i 3, do których odwołanie mieści się w rozdziale 4 stanowią krótkie fragmenty kodu numerycznego i raczej nie wnoszą nic do pracy. Z kolei w tekście pracy nie ma odwołania do wartościowego załącznika 4, w którym przedstawiono przebiegi błędu średniokwadratowego i współczynnika determinacji dla różnych wariantów sieci neuronowej.
- Tytuł rozdziału 4.4.3 jest zbyt odważnym skrótem myślowym. Chodzi o wpływ zastosowania dodatkowego parametru, tj. entropii statycznej na dokładność symulatora neuronowego.
- Spis oznaczeń zamieszczony na początku pracy nie odnosi się do terminów z zakresu sieci neuronowych. Wydaje się, że przydatny byłby słowniczek terminologii związanej z sieciami neuronowymi.

Rozdział 5 poświęcono możliwości wykorzystania opracowanego symulatora neuronowego do diagnostyki cieplno-przepływowej. Symulator pozwala na określenie zbioru stanów referencyjnych oraz poszukiwanie odstępstw stanu rzeczywistego od referencyjnego.

- Na rys. 5.1 prawdopodobnie wkradł się błąd. Chodzi prawdopodobnie o obszar na wylocie z wirnika stopnia 1. Stopnie wylotowe charakteryzują się niezerową reakcyjnością, tak więc uśrednione wartości ciśnienia w Tab. 5.1 raczej dotyczą obszaru na wylocie z wirnika, a nie z kierownicy stopnia 1.
- Jakiego rodzaju uśrednienie zastosowano dla wartości w Tab. 5.1?

Rozprawa doktorska mgr inż. Anny Milewskiej jest zredagowana starannie. Napisana jest dobrym stylem, przy użyciu poprawnej terminologii. Opracowanie graficzne rysunków i tabel w zdecydowanej większości nie budzi zastrzeżeń. Dużym walorem rozprawy jest rozdział 6 zawierający dobrze zredagowane podsumowanie skupiające się na otrzymanych wynikach pracy i oryginalnych elementach badań.

3. Wniosek końcowy.

Przedstawiona do opinii rozprawa doktorska charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym. Problematyka pracy mieści się w zakresie ważnego kierunku badań prowadzonych w wiodących ośrodkach naukowych w kraju i za granicą. Autorka wykazała się dużą erudycją i znajomością złożonych zagadnień cieplno-przepływowych bloków parowych. Zamieszczone w recenzji uwagi krytyczne i dyskusyjne nie rzutują na podstawowe walory pracy, jakimi są samodzielne rozwiązanie trudnego zagadnienia badawczego, oryginalność wyników oraz ich wartość utylitarna. Stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Milewskiej do publicznej obrony.