Dr hab. inż. Henryk Łukowicz
e-mail: henryk.lukowicz@polsl.pl
tel. kom. 506 895 027

Gliwice, 27.07.2022

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Adamowicza
„Modelowanie stanów rozruchowych turbiny"

Podstawą niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej prof. dr. hab. inż. Michała Wasilczuka z dnia 3 czerwca 2022 r. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Jerzy Głuch, profesor uczelni.

1. Wybór tematyki rozprawy doktorskiej

Przewidywany rozwój energetyki odnawialnej, a zwłaszcza farm wiatrowych i elektrowni słonecznych a także coraz bardziej rozwijającej się energetyki prosumenckiej, stawia przed krajową energetyką nowe wyzwania. Związane jest to z faktem, że produkcja energii elektrycznej z OZE cechuje się dużą zmiennością, co stawia przed energetyką nowe wyzwania dotyczące zapewnienia szybkiego reagowania na zmiany zapotrzebowanej przez sieć mocy, co sprowadza węglowe bloki energetyczne, które dominują w krajowej energetyce, do funkcji regulacyjnych. Dotyczy to zarówno eksploatowanych już starszych bloków klasy 200 MW i 360 MW jak i oddanych w ostatnim czasie dużych bloków na parametry nadkrytyczne, które będą musiały spełniać wymogi dużej elastyczności cieplnej. Zwiększenie elastyczności bloków wiąże się ze znacznie większymi prędkościami zmiany obciążenia, co powoduje zmianę naprężeń termicznych jak i naprężeń pochodzących od ciśnienia czynnika w elementach turbiny i kotła. Nakierowany na ten cel był zakończony w ubiegłym roku finansowany przez NCBiR projekt badawczy Bloki 200+, którego efektem było zwiększenie elastyczności bloków klasy 200MW m. in. w kierunku przyspieszenia ich uruchomień z dowolnych stanów cieplnych z możliwością przedłużenia ich eksploatacji przez najbliższe 10 – 15 lat. Wymóg szybkiej reakcji na dużą zmianę zapotrzebowania na energię elektryczną mogłyby spełnić będące w rezerwie bloki z turbinami gazowymi, które cechują się możliwością bardzo szybkiego uruchomienia w porównaniu do bloków parowych. Ponadto cechują się one znacznie niższą od bloków węglowych emisją CO_2 na jednostkę wytworzonej energii elektrycznej. Inwestycje w bloki gazowe ograniczają jednak ceny gazu, obecnie dochodzi również jego dostępność i związane z tym koszty wytwarzania energii elektrycznej.

Tematyka związana z uruchomieniami cieplnych maszyn energetycznych jest bardzo złożona z uwagi na szybko zachodzące niestacjonarne zjawiska związane z przepływem masy i ciepła. Prowadzenie poprawnego uruchomienia turbin ma bardzo duży wpływ na trwałość tych maszyn. Autor zajął się modelowaniem stanów rozruchowych turbiny gazowej, wykorzystując w tym celu sztuczne sieci neuronowe. Algorytmy genetyczne są coraz częściej stosowane w energetyce zarówno do regulacji, optymalizacji procesu, czy diagnostyki awarii. Swoje badania Autor oparł na dwuwałowym zespole turbiny gazowej o mocy 11MWe.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że tematyka rozprawy dotycząca modelowania stanów rozruchowych turbiny gazowej jest właściwie dobrana i bez wątpienia może stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej. Jest ona jak najbardziej aktualna i bardzo ważna dla energetyki oraz interesująca z naukowego i praktycznego punktu widzenia.

2. Zakres pracy

Praca składa się z siedmiu rozdziałów. W pierwszym będącym wprowadzeniem przedstawiono ogólne sformułowanie zagadnień, które są przedmiotem rozważań w niniejszej rozprawie.

W rozdziale drugim sformułowano cel i zakres pracy. Celem jaki sobie postawiono było utworzenie metod neuronowego modelowania sterowania rozruchem elektrownianych turbin gazowych w oparciu o rzeczywiste dane z obiektu. Podano uzasadnienie tematyki badań i przedstawiono przegląd literatury przedmiotu prezentując aktualny stan zagadnień będących przedmiotem rozważań w rozprawie.

Rozdział trzeci zawiera opis obiektu badań oraz wielkości mających wpływ na sterowanie zaworem paliwowym w czasie rozruchu zespołu turbiny. Autor dokonuje wyboru parametrów, które posłużą do opracowania metody modelowania początku rozruchu turbiny przy wykorzystaniu sieci neuronowej.

W rozdziale czwartym przedstawiono działanie narzędzi, które posłużyły do opracowania metody modelowania startu turbiny. Szczegółowo opisano architekturę sieci oraz zaprezentowano rezultaty obliczeń porównujących różne algorytmy uczące.

Rozdział piąty będący zasadniczą częścią rozprawy, zawiera uzasadnienie wyboru struktury sztucznej sieci neuronowej, model neuronowego sterowania rozruchem oraz przedstawia analizy modelowania wybranych modułów zespołu turbiny, a mianowicie:

- Pozycjonowania siłownika zaworu upustowego sprężarki.
- Pozycjonowania siłownika kierownicy sprężarki.
- Obrotów turbiny gazowej.
- Ciśnienia tłoczenia sprężarki.
- Spadku ciśnienia na filtrze powietrza dolotowego do sprężarki.
- Pozycjonowania zaworu paliwowego.

W rozdziale szóstym zaprezentowano możliwości wykorzystania modelu startowego turbiny gazowej dla celów diagnostycznych.

Rozdział siódmy stanowi podsumowanie zaprezentowanych w pracy badań. Przedstawiono wnioski oraz zasygnalizowano sposób wykorzystania opracowanych modeli.

W analizie rozpatrywanych w pracy zagadnień wykorzystywano język programowania Phyton, środowisko programistyczne PyCharm, biblioteki TesorFlow z Google Brain oraz kody własne.

Pracę zakończono spisem cytowanej literatury zawierającej 95 pozycji i 4 stron internetowych. Łącznie praca zawiera 82 strony maszynopisu wraz z rysunkami i tabelami.

3. Podstawowe osiągnięcia badawcze

Praca stanowi interesujący wkład poznawczy w zakresie nowych metod uruchamiania turbin gazowych. Za najważniejsze osiągnięcia Doktoranta uważam:

- Zebranie danych pomiarowych z obiektu rzeczywistego.
- Opracowanie opartego na metodzie neuronowej algorytmu uruchamiania zespołu turbiny gazowej.

4. Uwagi dotyczące redakcji pracy

Układ pracy jest przejrzysty i logiczny, należy podkreślić staranność w redakcji pracy, znajdując jedynie nieliczne błędy w znakach interpunkcyjnych. Zwróciłbym Autorowi uwagę na tytuł rozprawy w języku polskim, bowiem należałoby w nim dodać na końcu słowo „gazowych", tak jak jest w angielskim tłumaczeniu. Tytuł rozprawy w języku polskim sugeruje, że może dotyczyć również turbin parowych, podczas gdy ogranicza się ona wyłącznie do turbin gazowych.

5. Uwagi ogólne i merytoryczne

We wprowadzeniu napisano „…w trakcie stanu ustalonego, kiedy maszyna osiągnęła prędkość minimalną i może zostać obciążona odbiornikiem". Jak należy to rozumieć?

W punkcie 2.1 napisano „Przy rozruchu zachodzą zjawiska fizyczne skrajnie niestacjonarne i często przekraczające graniczne obciążenia…Ten etap stwarza szczególne trudności podczas uruchamiania…turbin parowych i gazowych" . Rzeczywiście etap uruchamiania turbiny cechuje się dużą niestacjonarnością, to nie mogę zgodzić się ze stwierdzeniem, że często przekraczane są w jego trakcie obciążenia graniczne. Od wielu lat biorę bowiem udział w pracach zespołu w KMiUE PŚ w zakresie opracowania algorytmów uruchomienia turbin parowych, które wykorzystywane są w regulacji wielu turbin w krajowej energetyce, w tym klasy 200MW i 360MW. Mają one prowadzić uruchomienie w taki sposób, by dla dowolnych warunków pracy nie dopuścić do przekroczenia granicznych obciążeń, które w efekcie prowadziłyby do zmniejszenia trwałości maszyny. Moim zdaniem, nie dopuszczenie do przekroczenia granicznych obciążeń obowiązuje również w przypadku rozruchu turbin gazowych.

W jakim stopniu poprawne uruchomienie odbiega o referencyjnego? Czy do turbiny wytwórca dołączył charakterystyki uruchomienia referencyjnego, tak jak jest to praktyką dla turbin parowych? Autor podaje, że temperatura między GG a GT w ciągu 10 sekund od zapłonu musi osiągnąć przynajmniej 200°C, ale nie może przekroczyć 800°C. To są wszystkie informacje oferowane przez układ sterowania silnikiem. Są to zatem wartości graniczne, a jakie wobec tego są referencyjne?

Szkoda, że Autor nie podał dokładniejszego opisu będącego przedmiotem prac zespołu turbiny gazowej. Chodzi tu zarówno o wielkości konstrukcyjne jak liczbę stopni sprężarki, turbiny sprężarkowej i napędowej oraz parametrów termodynamicznych czynnika w głównych punktach układu np. dla obciążenia nominalnego. Byłoby również pożądane zamieszczenie przebiegu tych parametrów w czasie pełnego rozruchu do momentu osiągnięcia nominalnej bądź zbliżonej do niej mocy elektrycznej turbiny. Dałoby to czytającemu możliwość lepszej oceny prezentowanych wyników.

Jak należy rozumieć w punkcie 2.3 pojęcie „optymalnej dokładności".

Na rys. 3.1 jako generator gazu (GG) oznaczona jest turbina napędzająca sprężarkę. Czy pod nazwą GG nie powinniśmy rozumieć zespołu: sprężarka, komora spalania i turbina sprężarkowa.

W rozdziale 3 napisano „…prędkość obrotowa GG jest zmienna i zależy od obciążenia generatora. Układ sterownia utrzymuje obroty turbiny napędowej w zakresie ±5% wartości ustalonej 1500 obr./min.". Obroty mogą się zatem zmieniać od 1425 obr./min. do 1575 obr./min., co odpowiada zmianie częstotliwości od 47.5 do 52.5 Hz. Czy praca na platformie dopuszcza taką zmianę częstotliwości. Częstotliwość jest bowiem bardzo ważnym wskaźnikiem określającym jakość energii. Jeśli na platformie pracują wszystkie zespoły turbin, to czy też to obowiązuje. W sieci energetycznej dopuszczalna zmiana częstotliwości nie powinna być większa od ±1%. Natomiast przy częstotliwości 47.5 Hz następuje odłączenie elektrowni od systemu, elektrownia przechodzi w tryb pracy wyspowej. Czy zmiana obrotów ±5% wartości nominalnej nie dotyczy charakterystyki statycznej regulacji obrotów tej turbiny.

Na rys. 3.4 - 3.6 brak jest dokładnego opisu osi a ponadto brak jednoznacznego opisu krzywych na wykresie utrudnia ich analizę.

Zostały podane wielkości graniczne, których nie można przekroczyć, np. temperatura gazu między generatorem gazu i turbiną napędową jest podczas startu ograniczona na poziomie 650°C, a po osiągnięciu przez GG 65% obrotów zostaje zwiększona do 750°C. Jaka powinna być referencyjna zmiana tej temperatury, czy producent turbiny dostarczył takich informacji?

Jak należy rozumieć opis „Temperatura turbiny gazowej" na rys. 3.4 – 3.7. Rysunek 3.7 wskazuje, że jest to temperatura gazu między GG i GT, natomiast podana nazwa może sugerować temperaturę metalu turbiny.

Czy w czasie uruchamiania zespołu turbiny jest sygnalizowana jakakolwiek wielkość wskazująca jak daleko punkt pracy sprężarki znajduje się od krzywej pompażu?

Na str. 26 użyto sformułowania „zawirników", którego nie spotkałem w teorii i konstrukcji sprężarek. Czy chodzi tutaj o ruchome kierownice stopni sprężarki?

Na str. 29 napisano „nagrzana turbina startuje szybciej z uwagi na mniejsze tarcia, jak i lepszą sprawność sprężarki". Moim zdaniem decydujący jest chyba wpływ temperatury elementów turbiny, co daje w efekcie mniejsze gradienty temperatury w tych elementach.

Na str. 31 użyto sformułowania „..co pogorszy jednorodność temperatur w turbinie… Nowa maszyna oddana do użytku będzie miała różnice temperatur w najcieplejszym i

najzimniejszym miejscu na poziomie 20-30°C…" Jak należy to interpretować, jakich miejsc to dotyczy? Z tekstu poprzedzającego to sformułowanie wynikałoby, że dotyczy to temperatury metalu, natomiast z dalszego tekstu i rys. 3.14 wynika, że chodzi tu chyba o rozkład temperatury gazu na wlocie do TG. Zawsze kiedy mówimy o temperaturze w turbinie, to powinniśmy jednoznacznie określić, czy chodzi o temperaturę metalu np. kadłuba turbiny, czy temperaturę gazu.

Na str. 32 napisano „pasożytnicze przepływy w sprężarce", należałoby napisać przecieki w sprężarce, bowiem pozałopatkowe przepływy w sprężarkach nazywamy przeciekami. Pasożyt jest natomiast terminem stosowanym w biologii i jest on jednoznacznie zdefiniowany.

W rozdziale 4 mógłby być dokładniejszy opis rys. 4.1. Bak jest w rozprawie pokazania pełnego uruchomienia z naborem mocy. Co rozumiemy przez rozruch turbiny, w którym momencie możemy mówić o zakończeniu procesu uruchamiania. Pełny proces uruchamiania turbiny obejmuje podnoszenie obrotów do chwili osiągnięcia obrotów nominalnych dla których zachodzi synchronizacja z siecią i następnie zwiększanie obciążenia do wymaganej mocy elektrycznej. Jeśli mielibyśmy turbinę dużej mocy, to przecież proces synchronizacji i naboru mocy takiej jednostki byłby w jeszcze większym stopniu istotny niż dla rozważanej w rozprawie turbiny. Autor nie sprecyzował co rozumie pod pojęciem „rozruch maszyny". Dlaczego 200 sekund uważa za najistotniejsze w procesie rozruchu.

W pracy nie jest rozpatrywany proces obciążenia turbiny mocą elektryczną. Podczas tego procesu zachodzi otwieranie zaworu paliwowego i zwiększanie przepływu przez sprężarkę w znacznie większym stopniu niż podczas rozpatrywanych stanów obejmujących 200 sekund od chwili startu. Obciążanie zespołu mocą elektryczną powoduje znaczną zmianę parametrów gazu zarówno w turbinie sprężarkowej jak i napędowej. Zmieniają się również warunki przepływu ciepła w elementach turbiny, co ma zwłaszcza wpływ na naprężenia termiczne w tych elementach. Dlaczego ten bardzo istotny etap uruchamiania został pominięty.

Na str. 35 napisano „Wyselekcjonowane dane musiały być wstępnie przeanalizowane w celu znalezienia reprezentatywnych próbek". Jakie były kryteria tej selekcji?

Czy 20 różnych startów, to były stany, którymi Autor dysponował – tak wynika z tekstu, czy były to już dane wyselekcjonowane. Czy były również rozpatrywane stany uruchomienia z paliwem ciekłym?

Zwróciłbym Autorowi uwagę na określenie żywotność, którego używa w tekście. Dla elementów technicznych powinniśmy używać terminu trwałość.

W punkcie 5.5 napisano „ Prędkość obrotowa turbiny gazowej ma kluczowe znaczenie dla zespołu generacyjnego, gdyż jej wartość po rozruchu musi znajdować się na ustalonej wartości 100%. Krzywa jej startu może posłużyć w ocenie stanu technicznego z uwagi na wiele komponentów, które mają na nią wpływ…Rys. 5.2". Autor nie rozpatruje zachowania układu po jego synchronizacji i w czasie obciążania generatora mocą elektryczną. Zatem w jaki sposób Autor wyobraża sobie sterowanie takim układem, do osiągnięcia obrotów nominalnych przez turbinę napędową regulacja obywa się według zaproponowanych algorytmów neuronowych, a dalej – dotychczasowy układ regulacji?

Rozdział 6 na str. 67 użyto słowa „wyżycie" w odniesieniu do maszyny i urządzenia. Powinniśmy mówić o zużyciu bądź degradacji tych elementów.

W rozdziale 6 Autor definiuje referencyjny model rozruchu jako: „Badany globalny system rozruchu przygotowany wg zasad trenowania modułów indywidualnych (Rozdział 5) tworzy poprawny, czyli referencyjny model rozruchu". Czy ta definicja jest tylko na potrzeby tego rozdziału, czy też obejmuje całą rozprawę? W eksploatacji turbin w zasadzie każdy rzeczywisty rozruch jest nieco inny od pozostałych. Natomiast rozruch referencyjny jest ściśle określony ze względu kryteria, które powinny być powinny być spełnione podczas tego procesu.

Omawiane w rozdziale 6 możliwości wykorzystania opracowanego modelu rozruchowego do monitorowania stanu technicznego odnoszą się jedynie do początkowej fazy uruchamiania, jeszcze przed synchronizacją zespołu z siecią elektryczną, podczas gdy pełne wnioski co do stanu elementów można wyciągnąć dopiero przy obciążeniu zespołu generowaną mocą elektryczną.

Jak Autor widzi przydatność opracowanego modelu do wdrożenia do systemów regulacji turbin gazowych. Jaka jest zaleta neuronowego modelowania sterowania rozruchem turbin gazowych w oparciu o rzeczywiste dane z obiektu w stosunku do istniejącego układu sterowania.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana praca doktorska dotyczy ważnej dla energetyki tematyki związanej z bezpieczną pracą turbin gazowych w początkowym etapie ich uruchamiania. Stanowi ona niewątpliwie istotny wkład dotyczący modelowania procesu rozruchu zespołów turbin gazowych. Bazując na zebranych przez siebie danych z rozruchu dwuwałowej turbiny gazowej Autor zbudował model uruchomienia jednostki z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych, co należy uznać za oryginalne osiągnięcie z naukowego a przede wszystkim z praktycznego punktu widzenia. Jest współautorem jednego opublikowanego artykułu w czasopiśmie za 40 punktów według punktacji MNiSW. Przedstawione w recenzji uwagi nie umniejszają mojej pozytywnej oceny pracy, a mogą posłużyć do poszerzenia tych interesujących prac w kierunku objęcia modelowaniem uruchamiania turbin gazowych również podczas naboru mocy elektrycznej.

Uważam, że przedstawiona praca doktorska **mgr. inż. Marcina Adamowicza** pt. **„Modelowanie stanów rozruchowych turbiny"** odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim określonym w obowiązującej ustawie i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.