

prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda
Instytut Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Marcina Plisa,
zatytułowanej „**Modelowanie matematyczne obiegu gazowo-parowego na
potrzeby diagnostyki cieplnej eksploatacji**”

1. Zasadność podjęcia tematu

Szybki postęp technologiczny, umiarkowane koszty inwestycyjne, wysoka sprawność stały się już od dłuższego czasu istotnymi atutami skutkującymi wysoką konkurencyjnością instalacji z wykorzystaniem turbin gazowych. W Polsce powstało, a także jest w budowie szereg kogeneracyjnych bloków gazowo-parowych. Do istniejących jednostek dużej mocy, dobrze poznanych w eksploatacji należy blok gazowo-parowy w EC Zielona Góra. Zebrane w trakcie jego użytkowania dane eksploatacyjne stanowią cenny materiał pomiarowy do budowy i walidacji modeli symulacyjnych. Dzięki dostępowi do tych informacji, w połączeniu z danymi technicznymi bloku powstaje unikalna możliwość walidacji oraz weryfikacji symulacyjnych modeli matematycznych budowanych na potrzeby diagnostyki cieplnej.

Autor ocenianej rozprawy, mgr inż. Marcin Plis, skorzystał z powyższej możliwości wybierając jej temat i pulę zagadnień do analizy. Przedmiotem rozważań w ocenianej pracy jest model matematyczny układu gazowo-parowego opracowany dla potrzeb systemów diagnostyki cieplnej oraz kontroli eksploatacji. Jako przykładowy obiekt rozważań został wykorzystany blok gazowo-parowy należący do Elektrociepłowni Zielona Góra. Model był przedmiotem walidacji w oparciu o wyniki pomiarów eksploatacyjnych. Istotną cechą modelu jest możliwość adaptacji do zmieniającego się stanu technicznego bloku. W przypadku układów gazowo-parowych jest to cecha szczególnie istotna. Należy pamiętać o istotnej zależności osiągow turbin gazowych oraz układów z ich wykorzystaniem od stanu technicznego komponentów, a także od bieżących warunków eksploatacyjnych wynikających choćby z poziomu zanieczyszczenia układu filtracji powietrza doprowadzanego do sprężarki oraz czystości układu przepływowego sprężarki.

Mgr inż. Marcin Plis, podejmując w pracy doktorskiej wskazaną problematykę skorzystał z doświadczenia oraz tradycji badawczych macierzystego Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej, zarówno w pracach nad badaniem własności układów gazowo-parowych jak i w obszarze analiz eksploatacyjnych instalacji energetycznych. Dobór tematyki i rozważanych zagadnień należy uznać za trafny, skutkujący nie tylko rozwinięciem nowego obszaru badawczego, ale również możliwością wykorzystania wyników w aplikacji na potrzeby przemysłu.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Rozprawa dotyczy opracowanego przez jej autora modelu matematycznego bloku gazowo-

parowego dla potrzeb diagnostyki cieplnej i kontroli eksploatacji. Jako przykład stanowiący podstawę szczegółowych rozważań oraz weryfikacji obliczeń symulacyjnych w oparciu o wyniki pomiarów eksploatacyjnych przyjęty został blok pracujący w EC Zielona Góra.

Oceniana rozprawa podzielona została na 6 ponumerowanych rozdziałów, w tym trzy stanowią „Wprowadzenie”, „Cel i zakres pracy” oraz „Podsumowanie”. Jej uzupełnienie stanowi zestaw trzynastu załączników, to jest:

- Opis algorytmu sterowania rozważanego w rozprawie zespołu turbiny gazowej,
- Kod programu służącego do uwiarygodnienia wyników pomiarów eksploatacyjnych zespołu turbiny gazowej metodą rachunku wyrównawczego bez linearyzacji równań warunków,
- Przykładowe wyniki obliczeń wyrównawczych zespołu turbiny gazowej,
- Kod programu do obliczeń symulacyjnych zespołu turbiny gazowej,
- Wyniki obliczeń symulacyjnych pracy zespołu turbiny gazowej,
- Kod programu służący do uwiarygodnienia wyników pomiarów eksploatacyjnych kotła odzyskowego metodą rachunku wyrównawczego bez linearyzacji równań warunków,
- Wyniki przykładowych obliczeń wyrównawczych kotła odzyskowego OU-192 dla wyników pomiarów ze średnią mocą turbiny gazowej 123,5 MWe,
- Porównanie iloczynu współczynnika przenikania ciepła i powierzchni ogrzewalnej k A obliczanego w oparciu o dane eksploatacyjne z wynikami z estymacji,
- Kod programu do obliczeń symulacyjnych pracy kotła odzyskowego dwuciśnieniowego „Model symulacyjny kotła OU-192”,
- Wyniki obliczeń symulacyjnych kotła odzyskowego dwuciśnieniowego OU-192,
- Porównanie wartości strumieni i parametrów termicznych uzyskanych z pomiarów i z modelu kotła odzyskowego dwuciśnieniowego OU-192,
- Kod programu do obliczeń symulacyjnych obiegu parowo-wodnego. „Model symulacyjny obiegu parowo-wodnego”,
- Wyniki obliczeń symulacyjnych obiegu parowo-wodnego turbiny parowej 7CK65.

Powyższe załączniki należy traktować w znacznej mierze jako integralną część rozprawy. Autor po wielokroć odwołuje się do ich treści, szczególnie w części związanej z opisem modelu kotła odzyskowego.

Bibliografia cytowana w rozprawie zawiera 120 pozycji, z czego 3 stanowią prace współautorskie Doktoranta opublikowane w recenzowanym czasopiśmie krajowym z listy B (Rynek Energii), jedna z konferencji naukowej (Rynek Ciepła), dwie z czasopism zagranicznych z listy A (Energy, IEEE Transactions on Industry Applications - odpowiednio 45 i 40 punktów na liście A). Jak należy zauważyć, **mgr inż. Marcin Plis dysponuje już znaczącym, jak na doktoranta, dorobkiem publikacyjnym.**

Na podstawową część pracy składają się trzy kolejne rozdziały, oznaczone numerami trzecim, czwartym oraz piątym, poświęcone odpowiednio modelom matematycznym: zespołu turbiny gazowej PG9171E, dwuciśnieniowego kotła odzyskowego OU-192 oraz obiegu turbiny parowej 7CK65. W każdym z tych rozdziałów Autor poświęcił uwagę opisowi rozważanego w nim obiektu modelowania, przeglądowi literatury z zakresu modelowania danej klasy obiektu, opisowi zbudowanego na potrzeby rozprawy modułu modelu matematycznego, kalibracji modelu, wynikom symulacji oraz weryfikacji modelu. Przyjęty podział rozważań na kwestie związane z podstawowymi podzespołami bloku jest w pełni logicznie uzasadniony. Opracowany model matematyczny bloku ma strukturę modułową. Trzy wspomniane podstawowe komponenty instalacji odpowiadają trzem podstawowym elementom struktury

modułowej modelu matematycznego. Wszystkie były przedmiotem złożonej od strony koncepcyjnej i pracochłonnej, wymagającej wypracowania właściwej, podlegającej bieżącej, modyfikowanej w bieżących analizach Doktoranta, koncepcji walidacji.

Cała rozprawa została skomponowana logicznie. Istotnymi jej walorami są: charakter aplikacyjny, realizacja w ścisłej współpracy z przemysłem (tu z EC Zielona Góra) oraz wykorzystanie możliwości niesionych przez współczesne techniki zbierania i przetwarzania wyników pomiarów realizowanych on-line. Ważną cechą opracowanego modelu jest możliwość obliczania wielkości eksploatacyjnych które nie są mierzone, w tym strumieni masy i parametrów czynników roboczych, a także wyznaczanie wskaźników oceny energetycznej (jednostkowe zużycie ciepła lub sprawność). Jako godną uwagi zaletę należy wskazać możliwość adaptacji modelu do zmieniającego się stanu technicznego instalacji. Należy także podkreślić fakt, że poprawność modelu diagnostycznego została zweryfikowana drogą porównania wyników obliczeń symulacyjnych z rezultatami pomiarów eksploatacyjnych.

Strona redakcyjna rozprawy została oceniona w kolejnym rozdziale niniejszej opinii.

3. Uwagi krytyczne, uwagi redakcyjne

Należy podkreślić, że przygotowanie rozprawy obejmującej szeroki zakres rozważań, dotyczącej kompleksowych obliczeń instalacji o złożonej strukturze technologicznej jest zadaniem bardzo pracochłonnym. Duży nakład pracy na opracowanie koncepcji, modeli cząstkowych, przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych, estymacji współczynników empirycznych oraz walidacji modeli cząstkowych spowodował przypuszczalnie brak sił Doktoranta na pełną weryfikację strony edycyjnej rozprawy. Stąd pojawiło się nieco usterek o charakterze redakcyjnym w postaci literówek, pomyłek, czy nie do końca zweryfikowanych informacji. Usterki takie proponuję usunąć przed wykorzystaniem materiału z rozprawy do ewentualnej publikacji.

Przykładowe usterki wymieniam poniżej:

- str. 34, pierwsza linia przedostatniego akapitu, „*głownie*” zamiast „*głównie*”,
- str. 34, koniec akapitu przedostatniego, powinno być „*dopływu paliwa*” zamiast „*paliwa*”,
- str. 34, ostatni akapit „*trybu przełączania na wtórny*” – tekst do korekty,
- str. 35, drugi akapit, czwarta linia „*wykrycia płomienia*”, powinno być „*wykrycie płomienia*”,
- str. 35, przedostatni akapit, przedostatnia linia „*pozwalana na*” – tekst do korekty,
- str. 38, w zdaniu nad nagłówkiem tabeli 3.3 brak jest słowa „*dane*”,
- str. 39, pierwszy akapit „*trzy grupy stopni*”, powinno być trzy stopnie, bowiem tyle ich jest w układzie rozważanej turbiny,
- str. 40, trzeci akapit od dołu, ostatnia linia, „*jest ustawiono*” – tekst do poprawy,
- str. 43, dwa ostatnie zdania wymagają korekty redakcyjnej,
- str. 87, wzory (4.3), (4.4) – niejednolity sposób opisu iloczynu współczynnika przenikania ciepła oraz powierzchni wymiany ciepła (kA) – z kropką lub bez,
- str. 87, zależności (4.6) oraz (4.9) – rozformatowane indeksy wielkości F_g i F_{g0} ,
- str. 89, brak słowa „*ciepła*” w zdaniu pod równaniem (4.13),
- str. 93, rys.4.1. przydatna byłaby legenda ze specyfikacją ponumerowanych na rysunku elementów kotła odzyskowego

- str. 110, ostatni akapit rozdziału 4.6, zapis „*Para przegrzana będąca traktowana jest jako gaz rzeczywisty*” wymaga usunięcia słowa „będąca”.

Szczegółowy wykaz zauważonych usterek tego typu zostanie przekazany Doktorantowi w opiniowanym egzemplarzu rozprawy.

Inną kategorię niedociągnięć w treści rozprawy stanowią:

- brak objaśnień odnośnie przyjętego sposobu wyznaczania niektórych wielkości, na przykład ciepła właściwego czynnika roboczego – zależność (3.7) na str. 59 rozprawy, podobnie zależności (3.22), (3.39) – nie wskazano czy to wielkość uśredniona, czy i jaki sposób uśrednienia przyjęto, jest to w pewnym sensie usterka typu redakcyjnego, bowiem Doktorant wyjaśnia to w rozdziale 4.6, czytelnik dowiaduje się więc o tym po lekturze opisu modelu turbiny gazowej, w końcowej fazie opisu modelu kotła;
- brak przekształceń wzorów wynikających z przeprowadzonego w tekście komentarza Autora, przykład stanowią zależności (3.9) oraz (3.13), które powinny zostać powiązane uproszczeniami według zależności (3.10), (3.11) i (3.12), wykorzystano tylko ostatnią z nich,
- wielokrotne powtarzanie w tekście rozprawy tych samych równań, przykład stanowią równania (3.5), (3.29), (3.35) oraz pozycja 2 w tablicy 3.7,
- niedociągnięcia oraz pomyłki we wzorach opisujących modele matematyczne komponentów poszczególnych modułów, na przykład: wskazanie na stronie 102 rozprawy $T_{sp\ 7}$ jako niewiadomej w modelu przegrzewacza pary NP (wielkość ta w nim nie występuje), użycie różnych indeksów we wzorze (4.39) oraz na rys. 4.4 w odniesieniu do tych samych wielkości – raz z użyciem dużych, raz małych liter, analogicznie w modelach kolejnych modułów kotła odzyskowego.

Walidację modelu turbiny gazowej Doktorant przeprowadził, zgodnie z informacją przedstawioną na str. 78, „*w oparciu o 38 zestawów uśrednionych pomiarów eksploatacyjnych w wyodrębnionych podokresach pracy, które zostały wcześniej poddane uwiarygodnieniu metodą rachunku wyrównawczego*”. W pracy zabrakło bliższej informacji o sposobie pozyskania danych, uśredniania parametrów eksploatacyjnych, jak długie okresy były przedmiotem uśredniania, jaki był charakter pracy maszyny w okresach podlegających uśrednianiu, czy i jakich warunków otoczenia to dotyczyło. Wyniki zestawione na wykresach sugerują, że punkty pracy dobrano kierując się poziomem mocy na zaciskach generatora turbiny gazowej. Uwagi o zbliżonym charakterze można by przedstawić w odniesieniu do walidacji modelu kotła odzyskowego (rozdział 4.8) w oparciu o 19 zestawów uśrednionych pomiarów. Jak się wydaje, celowym byłoby przedstawienie przez Doktoranta w trakcie obrony, bliższych informacji na ten temat.

4. Ostateczna ocena pracy

Do osiągnięć własnych Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie należy, według mojej oceny, zaliczyć:

- opracowanie autorskiego, kompleksowego podejścia do realizacji zadania polegającego na opracowaniu, weryfikacji i walidacji teoretyczno-empirycznego modelu matematycznego elementów stanowiących podstawowe moduły modelu bloku gazowo-parowego: turboszespołu gazowego, kotła odzyskowego oraz turboszespołu parowego bloku gazowo-parowego,
- opracowanie koncepcji i kodów do walidacji możliwych do aplikacji w różnych językach programowania, przeznaczonych dla potrzeb diagnostyki cieplnej kontroli eksploatacji.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny rozprawy, a Doktorant zrealizował postawiony sobie cel. Uważam, że należy podkreślić raz jeszcze wysoką pracowitość i użyteczny charakter przeprowadzonych badań.

Autor rozprawy, mgr inż. Marcin Plis, wykazał się wiedzą teoretyczną w dyscyplinie energetyka, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to jednoznacznie z jej treści.

Na podstawie przedstawionej do recenzji rozprawy stwierdzam, że jej Autor, mgr inż. Marcin Plis wykazał opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, umiejętność formułowania zadania naukowego, znajomość stanu osiągnięć w obszarze wiedzy związanej z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.

Będąca przedmiotem oceny rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Plisa **pt.: „Modelowanie matematyczne obiegu gazowo-parowego na potrzeby diagnostyki cieplnej eksploatacji”** spełnia wymogi określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki. W oparciu o powyższe stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

Z uwagi na wspomniane powyżej osiągnięcia Doktoranta, walory przedstawionej do oceny rozprawy, wysoki poziom, pracowitość oraz elementy poznawcze wynikające z poddania analizie niekonwencjonalnego podejścia do walidacji modelu elektrowni gazowo-parowej stawiam wniosek o wyróżnienie.

