

Prof. dr hab. inż. Janusz LEWANDOWSKI
Instytut Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Szapajko

pt.: „**Modelowanie empiryczne obiegu parowego dla zaawansowanych systemów kontroli eksploatacji**”

Oceniana prac doktorska zalicza się do grupy prac o charakterze obliczeniowym, a występujące w niej elementy nowości związane są z rozwojem metod informatycznego wspomaganie eksploatacji bloków energetycznych. Przedmiotem rozważań są zjawiska cieplno-przepływowe, związane z przemianami termodynamicznymi czynnika roboczego w obiegu parowym bloku energetycznego. Cel jaki stawia sobie doktorant to „... *opracowanie modeli matematycznych oraz metod i algorytmów obliczeniowych dla współcześnie budowanych systemów kontroli eksploatacji*”. Przedmiotem jego zainteresowań są różniące w pracy trzy rodzaje modeli: symulacyjne, bilansowe oraz walidacyjne.

Instalacje energetyczne to złożone systemy maszyn i urządzeń współpracujących w celu zamiany energii chemicznej paliwa na pracę mechaniczną, ciepło i energię elektryczną. Przed systemami tymi stawiane jest szereg wymagań, z których najistotniejsze to maksymalizacja sprawności przetwarzania energii oraz niezawodność. Specyficzną cechą, często trudną do pogodzenia z tymi wymaganiami, jest konieczność bieżącego dostosowywania wielkości produkcji do aktualnego zapotrzebowania na poszczególne produkty. Instalacja energetyczna pracuje w sposób ciągły ze zmiennym obciążeniem, zatem na poziomie kontroli eksploatacji konieczne jest podejmowanie ciągłych działań (sterowanie), które zapewnią pracę maszyn i urządzeń z możliwie najwyższą sprawnością i nie będą stwarzały zagrożenia awarią lub nadmiernym zwiększeniem zużycia. Wymienione wymagania i warunki pracy nadają szczególne znaczenia systemom kontroli eksploatacji. Nie ulega zatem wątpliwości, że opiniowana praca dotyczy ważnego problemu technicznego, który ciągle jeszcze nie jest w pełni rozwiązany. Spełnia zatem podstawowe wymaganie jakie stawiane jest rozprawom doktorskim.

Opiniowana rozprawa doktorska liczy 281 stron, obejmuje dziewięć rozdziałów oraz wykaz oznaczeń i spis literatury zawierający 110 pozycji. Pracę uzupełnia 14 załączników z tekstami programów obliczeniowych szczegółowymi wynikami obliczeń oraz wyprowadzeniem równania przelotności (przelotowości) dla grupy stopni turbinowych.

W pierwszym rozdziale zatytułowanym 'Wprowadzenie' Autor umieścił nie tylko ogólne informacje wprowadzające czytelnika w temat rozprawy, ale określił też cel pracy, obiekt rozważań oraz zakres badań. Cel pracy określony został niestety bardzo ogólnie, a przez to nieprecyzyjnie: „*Głównym celem pracy doktorskiej było opracowanie modeli matematycznych oraz metod i algorytmów obliczeniowych dla współcześnie budowanych systemów kontroli eksploatacji*”. Obiekt i zakres rozważań zostały określone nietypowo bo poprzez wyliczenie co zrobiono w ramach pracy. Niepotrzebnie może to sugerować, że zdefiniowane zostały w sposób wtórny tj. po zakończeniu badań.

Drugi rozdział pracy zawiera krótkie omówienie stosowanych dotychczas w świecie i w Polsce systemów kontroli pracy obiektów przemysłowych oraz definicje najczęściej stosowanych w praktyce wskaźników charakteryzujących warunki eksploatacji.

W rozdziale trzecim Doktorant omawia rezultaty uzyskane przy modelowaniu matematycznym obiegu wodno - parowego turbozespołu kondensacyjnego z turbiną 18K370 (Elektrownia Opole - ?). Rozpatrywane są dwa rodzaje modeli matematycznych, nazywane przez Autora „bilansowym” oraz „symulacyjnym” Oba uwzględniają tylko ustalone stany pracy. Nazwa „symulacyjny” bez dodatkowego przymiotnika wydaje się więc trochę na wyrost. Znaczącą część tego rozdziału wypełniają rysunki i dane techniczne najważniejszych elementów rozpatrywanego turbozespołu, Model „bilansowy” tworzą równania bilansu masy i energii oraz równania opisujące związki między parametrami pary wodnej i wody (model matematyczny czynnika roboczego). Wielkościami zadanymi do obliczeń są, określone na drodze pomiarowej, ciśnienie i temperatura strumieni czynnika roboczego na granicach osłon bilansowych, a niewiadomymi strumienie masy. Jest to klasyczny dla turbozespołu problem obliczeniowy i dostępnych jest wiele komercyjnych programów pozwalających na jego rozwiązanie, w tym wykorzystywany przez Autora Engineering Equation Solver. Model bilansowy, a dokładniej uzyskane z niego wyniki wykorzystane są w pracy do określenia zależności aproksymacyjnej pozwalającej na wyznaczanie stopnia suchości pary na wlocie do skraplacza. Autor zaproponował tu kilka zależności wiążących wilgotność z mocą turbozespołu, ciśnieniem w skraplaczu oraz temperaturą i strumieniem masy wody chłodzącej. Za najlepszy model uznał zależność, w którym wejściami są moc i parametry wody chłodzącej.

Model nazywany przez Doktoranta symulacyjnym nie wykorzystuje bezpośrednio danych pomiarowych. Zawiera równania bilansowe, a parametry czynnika roboczego wyznaczone są z charakterystyk elementów na jakie dla celów modelowania zdekomponowany został turbozespół. Charakterystyki takie to przykładowo równania przelotności (przelotowości) grup stopni turbiny, równania określające sprawność grup stopni, charakterystyki opisujące intensywność wymiany ciepła w wymiennikach itp. Model nazwany w pracy symulacyjnym w literaturze nazywane jest także „what if” lub „of design”.

Istotną i oryginalną cechą modelu opracowanego przez Doktoranta jest wykorzystanie w nim charakterystyk określonych na podstawie danych pomiarowych. Ilustracją możliwości wykorzystania opracowanego modelu symulacyjnego jest analiza wpływu wybranych parametrów eksploatacyjnych na wielkość jednostkowego zużycia ciepła.

Rozdział czwarty o strukturze i zawartości podobnej do poprzedniego poświęcony jest modelowaniu bloku ciepłowniczego. Model bilansowy i symulacyjny opracowano tym razem dla turbozespołu z turbiną 13 CK70 (Jaworzno III - ?).

Rozdział piąty zawiera wyniki uzyskane przez Doktoranta w ramach prac nad modelowaniem kotłów parowych. Dla dwóch obiektów kotłów: pyłowego BP-1150 i fluidalnego (CFB 260) wyznaczone zostały charakterystyki sprawnościowe z wykorzystaniem dwóch modeli: tradycyjnego aproksymacyjnego, w którym sprawność kotła uzależniona jest od jego obciążenia i wartości opałowej paliwa oraz mieszanego analityczno – aproksymacyjnego. W tym ostatnim jako technikę aproksymacji wykorzystano sieci neuronowe.

Kolejny rozdział pracy poświęcony jest uwiarygadniania wyników pomiarów z wykorzystaniem metody rachunku wyrównawczego. Dla obu rozpatrywanych turbozespołów przygotowano modele walidacyjne i w pracy w tabelach 6.1 – 6.4 zamieszczono wyniki obliczeń zawierające porównanie wielkości bezpośrednio z pomiarów i skorygowanych. Niestety wyniki te budzą wątpliwości. Korekta wielu istotnych wielkości jak bardzo duża. Przykładowo w bloku kondensacyjnym prawy strumień pary świeżej (tab. 6.4) korygowany jest o ponad 7%. W tabeli 6.3 znajdują się wielkości, które na pewno nie są prawdziwe (moc wewnętrzna części WP turbiny 1024 MW, strumień pary upustowej 574 t/h). Należy wierzyć, że są to tylko błędy redakcyjne.

Rozdział 7 nosi tytuł „*Krzywe korekcyjne*” i Autor zamieścił w nim krzywe korekcyjne dla rozpatrywanych w pracy turbozespołów. Niestety nie zamieścił jednoznacznych informacji, ale wydaje się, że nie są to charakterystyki wyznaczone w ramach pracy, a dostarczone przez wytwórcę dla celów pomiarów gwarancyjnych. Jeżeli tak, to jest

niezrozumiałe po co zostały zamieszczone w pracy. Są one co prawda wykorzystywane do wyznaczania skutków, jakie w trakcie eksploatacji niesie za sobą niedotrzymywanie znamionowych parametrów pracy (tzw. „straty kontrolowane”), ale to nie wydaje się być wystarczającym powodem.

Problematyce „strat kontrolowanych” poświęcony jest 8 rozdział pracy. Moduł do wyznaczania wpływu odchyłek na osiągi bloku energetycznego stanowi obecnie pewien standard wyposażenia cyfrowych systemów kontroli eksploatacji. Najczęściej wykorzystywana jest tu opracowana przez pracowników Energopomiaru tzw. metoda TKE wykorzystująca „krzywe korekcyjne”. Doktorant istotnie zmodyfikował tę metodę zastępując „krzywe korekcyjne” modelem symulacyjnym. W pracy zamieszczone zostało porównanie między wynikami uzyskiwanymi metodą oryginalną i zmodyfikowaną. Komentując wyniki tego porównania Doktorant stwierdza, że uzyskał dobrą zgodność, co świadczy tylko o tym, że stan techniczny turbozespołu nie uległ w trakcie eksploatacji istotnemu pogorszeniu, a tym samym „krzywe korekcyjne” nie uległy dezaktualizacji.

Pracę zamyka rozdział „Podsumowanie i wnioski” a uzupełnia 14 załączników.

Ogólna ocena pracy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy nowej i ważnej, z punktu widzenia kontroli eksploatacji, problematyki związanej z wykorzystaniem w cyfrowych systemach kontroli eksploatacji modelowania matematycznego. Za oryginalne osiągnięcie Doktoranta uznać należy przede wszystkim opracowanie modelu symulacyjnego turbozespołu parowego wykorzystującego wyznaczone eksperymentalnie charakterystyki urządzeń oraz algorytmów i programów do monitorowania „strat kontrolowanych”, w których model symulacyjny zastępuje „krzywe poprawkowe”. Osiągnięcia te pozwalają pozytywnie ocenić pracę Doktoranta niezależnie od przedstawionych poniżej uwag krytycznych i dyskusyjnych.

Uwagi krytyczne i dyskusyjne

1. W tradycyjnie redagowanych rozprawach doktorskich bardzo wyraźnie określone są cel (teza), obiekt i zakres pracy. Doktorant nie zastosował takiej redakcji, a forma pracy przypomina raport z realizacji pracy badawczej. Utrudnia to recenzentowi jednoznaczną ocenę ważnego dylematu czy praca stanowi rozwiązanie świadomie postawionego, oryginalnego zadania badawczego, czy jest luźnym zbiorem wyników badań, które można ze sobą powiązać.

2. Tradycyjnie w pracach doktorskich związanych z modelowaniem matematycznym opracowywany jest możliwie ogólny model, a jego szczegółowe implementacje dla konkretnych urządzeń mają charakter ilustracyjny. Autor nie przedstawił w rozprawie takiego ogólnego, uniwersalnego modelu, a niezależnie opisuje modele dla konkretnych turbozespołów kondensacyjnego i ciepłowniczego. Pozbawia w ten sposób pracę elementów uniwersalności.
3. Do określenia charakterystyk wykorzystywanych w modelu symulacyjnym używane są wyniki badań eksploatacyjnych i specjalnych, najprawdopodobniej gwarancyjnych. Niestety w opisie wyników nie w każdym przypadku jest jednoznacznie określone z jakich pomiarów korzystano, a nie jest to obojętne dla jakości wyników modelowania.
4. W modelu bilansowym wykorzystywane są pomiary ciśnienia i temperatury pary w upustach regeneracyjnych. Odtwarzana jest także linia rozprężania w turbinie. Znane jest zjawisko występowania znaczących różnic wartości temperatury między grupami stopni, a temperaturą pary w rurociągu z upustu między grupami. Doktorant zupełnie pominął ten problem.
5. Interesującym szczegółowym wynikiem zamieszczonym w pracy jest zależność pozwalająca określać stopień suchości pary na wylocie z turbiny. Niestety zarówno zmienne niezależne jak i postacie funkcji wydają się dobrane dość przypadkowo, a tym samym wnioski o jakości aproksymacji bardzo ograniczone. Przy stałej temperaturze pary dolotowej oraz wtórnie przegrzanej, określonym jednoznacznie związku między ciśnieniem pary dolotowej a strumieniem masy pary przed turbiną i niezmienną strukturze turbozespołu zarówno stopień wilgotności pary jak i ciśnienie w kondensatorze zależą od strumienia pary oraz strumienia i temperatury wody chłodzącej. Zależność wilgotności od mocy elektrycznej i ciśnienia w skraplaczu ma charakter wtórny. Teoretycznie należałoby więc dążyć do określenia zależności uwzględniającej wpływy pierwotne.
6. Na jakiej podstawie Autor twierdzi, że trudno jest wytłumaczyć teoretycznie wpływ strumienia masy pary świeżej na jednostkowe zużycie ciepła (str. 74). Wpływ ten jest przecież najistotniejszy i oczywisty. Jego znajomość pozwala już na etapie projektowania turbozespołu określić obciążenie przy którym jednostkowe zużycie ciepła będzie najmniejsze.

Opiniowana prac zawiera niestety sporo błędów redakcyjnych, z których kilka związanych z rozdz.6, zostało już wcześniej zauważonych. Ponieważ inne błędy nie mają większego wpływu na ocenę rozprawy, pominięto je w niniejszej opinii, zakładając, że zostaną usunięte w przypadku dalszego publikowania wyników pracy.

Podsumowanie

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy tematyki nowej, perspektywicznej i ważnej z punktu widzenia informatycznego wspomaganie eksploatacji urządzeń w energetyce. Zawiera szereg oryginalnych elementów, zarówno o charakterze ogólnym, związanym z modelowaniem matematycznym procesów ciepłno – przepływowych zachodzących w instalacji energetycznych, jak i szczegółowym, pozwalającym na poznanie szeregu cech i własności rozpatrywanych urządzeń. Wskazuje także (choć czasami pośrednio) kierunki dalszych badań.

Z pełnym przekonaniem mogę stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Szapejko pt.: „Modelowanie empiryczne obiegu parowego dla zaawansowanych systemów kontroli eksploatacji” spełnia wymogi ustawowe i w oparciu o powyższe stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

