

Recenzja rozprawy doktorskiej
Mgr inż. Marcina PILARCZYKA

„Analiza cieplno-wytrzymałościowa krytycznych elementów kotła energetycznego dużej mocy w warunkach nieustalonych”

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Bohdan Węglowski, prof. PK

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Paweł Ocłoń, prof. PK

Podstawą formalną opracowania recenzji jest zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej z dnia 18.12.2017.

A. OCENA TEMATYKI PODJĘTYCH BADAŃ

Zmiana struktury źródeł wytwarzania energii elektrycznej charakteryzująca się rosnącym udziałem odnawialnych źródeł energii, w tym przede wszystkim energii pozyskiwanej z wiatru, podyktowana jest przede wszystkim względami ochrony środowiska. Równocześnie następuje wymiana długo eksploatowanych węglowych bloków energetycznych na jednostki nowe o dużych mocach rzędu 1000 MW pracujących z czynnikiem na parametry nadkrytyczne. Bloki te posiadające wysoką sprawność wytwarzania energii powyżej 45% pozwalają w znaczący sposób obniżyć jednostkową emisję dwutlenku węgla w przeliczeniu na jednostkę wyprodukowanej energii. Stąd też w obecnej chwili struktura systemu wytwarzania energii obejmuje stare bloki węglowe, nowe nadkrytyczne bloki węglowe i odnawialne źródła energii. W tej strukturze szczególna rola przypada blokom węglowym, które w wielu krajach ciągle jeszcze są podstawą zabezpieczenia dostaw energii. Muszą one równocześnie spełniać wymagania efektywności ekonomicznej, ochrony środowiska a także wymagania znacznie większej elastyczności cieplnej. Ten ostatni wymóg podyktowany jest priorytetami wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych, w tym przede wszystkim z elektrowni wiatrowych, w których produkcja energii zmienia się często w sposób stochastyczny. Pojawiające się w systemie braki energii spowodowane mniejszą produkcją energii z wiatru muszą być zatem pokrywane przez bloki węglowe. Istotnym problemem staje

się zatem zdolność tych bloków do przejścia z pracy podstawowej do pracy regulacyjnej, możliwość szybkich zmian obciążania oraz skracanie czasu rozruchów.

Realizacja takich wymagań zapewnia systemowi odpowiednią niezawodność dostaw niezbędnej ilości energii, może jednak rodzić również szereg problemów związanych z cykliczną pracą bloków oraz dużą częstotliwością zmian mocy. Taki tryb pracy skutkuje istotnymi zmianami stanów cieplnych i wytrzymałościowych elementów kotłów i turbin, a to z kolei wpływa na trwałość i bezpieczeństwo ich pracy.

Zagadnienia zwiększonej cykliczności pracy bloków węglowych są tematem wielu aktualnie prowadzonych prac. Recenzowana praca w której przeprowadzono analizę cieplno-wytrzymałościową krytycznych elementów kotła energetycznego w warunkach pracy nieustalanej wpisuje się zatem w nurt w/w tematyki. Podjęcie tych badań należy zatem uznać za uzasadnione. Należy również podkreślić, że jest ona kolejnym rozwinięciem i rozszerzeniem badań w zakresie szeroko rozumianej techniki kotłowej prowadzonych w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Krakowskiej.

B. CHARAKTERYSTYKA PRACY

Recenzowana praca doktorska liczy 150 stron i została podzielona na 11 rozdziałów, dwa załączniki oraz spis literatury. W początkowych dwóch rozdziałach pracy Autor omawia aktualną strukturę wytwarzania energii elektrycznej w Polsce, a także wyzwania stojące przed tym sektorem, w szczególności w zakresie zwiększenia elastyczności pracy jednostek wytwórczych oraz konieczności wdrażania w najbliższych latach konkluzji BAT.

W rozdziale drugim opisano dotychczasowy stan badań w zakresie tematyki identyfikacji stanów cieplno-wytrzymałościowych w elementach ciśnieniowych kotłów w nieustalonych fazach pracy. W rozdziale trzecim Autor precyzuje główny cel pracy, którym jest „...opracowanie oraz eksperymentalna weryfikacja metody do wyznaczania nieustalonych pól temperatury w cylindrycznych elementach grubościennych”. Podaje również zrealizowane zadania cząstkowe, które powinny zapewnić osiągnięcie celu głównego. Wśród tych zadań podano m.in. modernizację stanowiska laboratoryjnego, opracowanie metody korekcji temperaturowej wskazań tensometrów, opracowanie algorytmu rozwiązania zagadnienia odwrotnego, opracowanie modelu i obliczenia metodą elementów skończonych, badania eksperymentalne, szczegółowa analiza termo-wytrzymałościowa komory wylotowej kotła OP-650. Rozdział ten kończy sformułowanie tezy pracy, mówiącej że eksperymentalnie zweryfikowana metoda wyznaczania rozkładu temperatur i naprężeń pozwala na przeprowadzenie kompleksowej analizy cieplno-wytrzymałościowej krytycznych elementów kotła w stanach nieustalonych. W rozdziale czwartym opisano procedurę rozruchową kotłów energetycznych zwracając szczególną uwagę na zmienność parametrów pary w fazie rozruchu i w fazie odstawienia kotła. Przytoczono fabrycznie określone dopuszczalne szybkości nagrzewania walczaków i rurociągów pary świeżej a także różnic temperatur dla wybranych kotłów energetycznych. Przytoczono również przykłady istniejących procedur pozwalających na zwiększenie dynamiki pracy kotłów. W kolejnym piątym rozdziale pracy omówiono szczegółowo stanowisko do badań komputerowych układów monitorowania i eksploatacji kotłów parowych. Przedstawiono zakres prac modernizacyjnych zaproponowanych przez Doktoranta, których realizacja pozwoliła na rozszerzenie zakresu możliwości badawczych. Opisano także system pomiarowy zainstalowany na w/w stanowisku, w skład którego wchodzi m.in. układ termoelementów, układ tensometrów oraz system akwizycji danych. Rozdział szósty pracy zatytułowany tensometria elektrooporowa podaje informacje dotyczące praktycznych aspektów prowadzenia pomiarów odkształceń nagrzewanych elementów. Szczegółową uwagę

zwrócono na opis metodyki korekcji temperaturowej koniecznej przy pomiarach tensometrycznych naprężeń termicznych. Podano zależności analityczne umożliwiające dokonanie korekty wskazań tensometrów.

Jednym z głównych rozdziałów pracy jest rozdział siódmy poświęcony identyfikacji pola temperatury traktowanej jako rozwiązanie tzw. zagadnienia odwrotnego. W pierwszej części rozdziału przedstawiono rozwiązanie ściśle Stefana – Burggrafta – Langfarda dla nieustalonego przewodzenia ciepła w płycie, które posłużyło następnie do weryfikacji dokładności rozwiązania numerycznego opartego na metodzie objętości skończonych. Tą właśnie metodę numeryczną zastosowano w opracowanym modelu komory parowej. Podano podział komory na objętości skończone, numerację węzłów oraz kompletny układ równań dla wszystkich węzłów. Z uwagi na dużą wrażliwość rozwiązania odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła na przypadkowe błędy pomiarowe Autor zaproponował zastosowanie odcinkowych filtrów cyfrowych, które w istotny sposób eliminują wpływ przypadkowych błędów na wyniki obliczeń. Rozdział ósmy zawiera algorytm do wyznaczania nieustalonego pola temperatury w elemencie cylindrycznym. Przeprowadzono walidację wyników obliczeń rozkładów temperatury uzyskanych opracowanym algorytmem opartym na metodzie objętości skończonej przez porównanie z metodą analityczną. Zwrócono uwagę na istotny problem doboru optymalnej długości kroku czasowego.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono analizę cieplno-wytrzymałościową komory parowej będącej głównym elementem instalacji laboratoryjnej. W obliczeniach wykorzystano wyniki pomiarów eksperymentalnych przebiegów temperatury na powierzchni zewnętrznej komory, a także przebiegi ciśnienia czynnika roboczego. Podano porównanie przebiegów temperatury w wybranych charakterystycznych punktach komory uzyskane z pomiarów oraz obliczone metodą objętości skończonych i metodą elementów skończonych. Zwrócono uwagę na znaczne różnice temperatury występujące na obwodzie badanej komory co związane jest z dużym zróżnicowaniem wartości współczynników wnikania ciepła na powierzchni wewnętrznej w dolnej i górnej części komory. Obliczone temperatury zostały następnie wykorzystane do obliczeń naprężeń termicznych. Do ich wyznaczenia użyto zależności analitycznych jak i metodę elementów skończonych. Wyniki obliczeń naprężeń porównano z naprężeniami wyznaczonymi na podstawie pomierzonych odkształceń. Uzyskano dobrą zgodność wartości naprężeń w różnych punktach komory zarówno obliczonych różnymi metodami jak i z wartościami pomierzonymi doświadczalnie.

Zastosowanie opracowanych algorytmów wyznaczenia rozkładów temperatur i naprężeń do analizy obiektów rzeczywistych zawiera rozdział dziesiąty. Omówiono w nim modelowanie stanów cieplno-wytrzymałościowych w komorze parowej kotła OP-650. Obliczenia prowadzono metodami analitycznymi oraz metodą elementów skończonych. Uzyskane wyniki rzeczywistych szybkości nagrzewania przy rozruchach ze stanu zimnego porównano z zaleceniami producenta oraz normą PN-EN 12952-3.

Podsumowanie przeprowadzonych badań, a także wnioski końcowe zawiera rozdział jedenasty. Stwierdzono w nim, że opracowana i zweryfikowana metoda analizy stanów cieplnych i wytrzymałościowych może być stosowana do identyfikacji cieplnych warunków pracy grubościennych elementów kotłów w stanach nieustalonych, w tym również do monitorowania naprężeń w trybie on-line.

C. UWAGI DYSKUSYJNE

Pytania do pracy

- a) Na stronie 10 Autor podaje bardzo optymistyczne wartości skrócenia czasu rozruchu bloku 200 MW. W dalszych rozdziałach pracy również wspomina o możliwościach skracania, ale już nie w takim zakresie. Jakie są zatem realne minimalne czasy rozruchu kotła OP-650 i całego bloku klasy 200 MW ze stanu zimnego, ciepłego i gorącego?
- b) W jaki sposób w praktyce opracowany algorytm może posłużyć do skracania rozruchu kotła?
- c) Na stronie 55 punkt 6 algorytmu podaje kryterium zakończenia procesu iteracyjnego jako dopuszczalną względną wartość przyrostu temperatury w węźle „i” w danym kroku czasowym Δt . Jeżeli krok ten został przyjęty jako stały (punkt 1) to rzeczywista wartość przyrostu temperatury w tym czasie wynika z warunków brzegowych i nie powinna chyba być ograniczana tak jak to wynika z zależności 8.1. Proszę zatem o doprecyzowanie tego zagadnienia.
- d) Czy dokonano w każdym przypadku sprawdzenia jakości siatek obliczeniowych w metodzie elementów skończonych?

Uwagi redakcyjne

- str. 13 błędny zapis „... odpowiada lokalizacji węzłom...”.
- str. 43 błędny zapis „... którego powierzchnia wewnętrzna zmienia się w sposób sinusoidalny..”
- str. 53 błędny zapis „... -L, L+1, ...L+1, L...”
- str. 57 różnica temperatur 0,499°C powinna być zapisana jako 0,499K
- str. 76 błędny numer równania (35)
- str. 77 błędny zapis „równanie (9.23) posiada...” powinno być (9.22)
- str. 77 błędny zapis „oddalone o siebie”
- str. 79 błędne numery wzorów (44) oraz (45)
- str. 81 błędny zapis „... warunków brzegowych koniecznych _ wyznaczenia...”
- str. 95 błędny zapis „... naprężenia przyjmują ujemne wartości lecz wyraźnie co do wartości bezwzględnej...”
- str. 104 błędny numer wzoru „... na rys. 10.4 został...” powinno być na rys. 10.5
- str. 105 błędny numer wzoru „... punkty A i B patrz rys. 10.4..” powinno być rys. 10.5
- str. 110 błędny numer rysunku analizując rysunek 3 można...”

D. OCENA KOŃCOWA

W recenzowanej rozprawie Doktorant podejmuje bardzo istotną problematykę oceny zmienności stanów ciepłno-wytrzymałościowych w ciśnieniowych elementach kotła spowodowanych zmiennymi warunkami pracy. Dokładne rozpoznanie istoty i wartości generowanych naprężeń może pozwolić na ocenę ich wpływu na bezpieczeństwo eksploatacji oraz trwałość elementów kotłów. Praca ma zatem duże walory zarówno teoretyczne jak i użyteczne. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt skutecznego połączenia analiz teoretycznych z eksperymentem na celowo zmodernizowanym stanowisku badawczym. Autor opracował własne algorytmy obliczeń stanu naprężenia w niestabilnych stanach pracy w elementach cylindrycznych, w których występuje zmienny po obwodzie rozkład

temperatury. Algorytmy te zostały zweryfikowane innymi bardziej dokładnymi metodami numerycznymi, a także pomiarami na stanowisku badawczym.

Mgr inż. Marcin Pilarczyk w ocenianej rozprawie wykazał się szeroką wiedzą zagadnień wymiany ciepła, planowania i przeprowadzania badań eksperymentalnych, a także zaawansowanego modelowania numerycznego zjawisk cieplno-wytrzymałościowych występujących w elementach kotłów energetycznych.

Doktorant zrealizował w całości zakres planowanych badań i osiągnął założone cele. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie o stopniach i tytule naukowym i wnioskuję do Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

