

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Karola Kaczmarzkiego pt.: „Modelowanie nagrzewania rurociągu łączącego kocioł z turbiną– zagadnienia bezpośrednio i odwrotne”

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgra inż. Karola Kaczmarzkiego stanowi pismo M.00-520-/2019 dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej z dnia 29.04.2019 r.

1. Uwagi wstępne

Wyznacznikiem rozwoju cywilizacyjnego kraju jest poziom zużycia energii, która w swej głównej części pochodzi z elektrowni zasilanych paliwami kopalnymi. Uzyskanie wysokich sprawności wiąże się z podniesieniem parametrów pary co w konsekwencji wymaga stosowania specjalnych materiałów na elementy kotła, rurociągów doprowadzających parę do turbiny i turbinę. Zmiana zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepłą powoduje zmienne obciążenie wszystkich elementów składowych obiegu elektrowni. Analiza obciążeń cieplnych najbardziej wrażliwych elementów obiegu cieplnego pozwoli na opracowanie metod optymalnego prowadzenia pracy elektrowni. Realizacja tego celu wymaga rozwiązania wielu zagadnień cząstkowych omówionych w recenzowanej pracy.

2. Omówienie pracy

Zmiany obciążenia cieplnego czy to w procesie rozruchu ze stanu zimnego czy w procesie zmiennego zapotrzebowania na energię elektryczną wywołują zmiany naprężenia termicznego szczególnie wrażliwych elementów którymi są walczaki, schładzacz, rurociągi parowe, trójniki, separatory oraz zawory charakteryzujące się dużymi średnicami i grubościami ścianek. Obciążenia mechaniczne wywołwane są dodatkowo wysokim ciśnieniem pary. Długotrwałe i zmienne w czasie obciążenia prowadzą do szczególnie wysokich wartości naprężenia na brzegach otworów co w konsekwencji wywołuje pęknięcia zmęczeniowo-ciepne. Duże gradienty temperatury (a stąd naprężenia termicznego) są wynikiem szybkich zmian temperatury pary. Przeto jawi się pytanie o prowadzenie zmiennego obciążenia cieplnego (szybkości nagrzewania) we wspomnianych wrażliwych elementach pod kątem nieprzekroczenia dopuszczalnego naprężenia termicznego z zachowaniem najkrótszego czasu do osiągnięcia założonej mocy bloku. Czas ten określa element dla którego szybkość nagrzewania jest najmniejsza.

Problem zmiennego obciążenia cieplnego (optymalnej szybkości nagrzewania) nabrał szczególnego znaczenia związanego z powstaniem farm wiatrowych, które z jednej strony stanowią odnawialne źródła energii z drugiej zaś posiadają zmienną produkcję energii zależną od wiatru. Zatem utrzymanie stałego poziomu produkcji energii jest przeto niezwykle

ważnym problemem związanym z szybkością nagrzewania krytycznych elementów obiegu cieplnego. Projektowane obecnie nowe jednostki produkcji energii umożliwiają zwiększenie lub obniżenie mocy rzędu 2-8% zainstalowanej mocy na minutę w pełnym zakresie sterowania. Proces sterowania rozruchem czy zmianą szybkości nagrzewania musi uwzględniać minimalizację awarii czy przyspieszonej degradacji bloku. Dla optymalnego przeprowadzenia procesu nagrzewania należy dokonywać ciągłego monitoringu wielkości temperatury w newralgicznych elementach. Ze względu na niemożność pomiaru temperatury na przykład na powierzchniach rurociągu łączącego kocioł z turbiną, przeto w celu określenia rozkładu temperatury w ścianie rurociągu należy rozwiązać zagadnienie odwrotne określające warunki brzegowe ; zagadnienie to wymaga znajomości temperatury w punktach umieszczonych w ścianie rurociągu. Zagadnienia odwrotne należą do klasy zagadnień źle postawionych w sensie Hadamarda. Autor opiera się tutaj na metodzie bilansowej a nie różnicowej w której nie zachodzi dokładne bilansowanie się energii. Takie ujęcie pozwala na uniknięcie regularyzacji zagadnienia odwrotnego w którym wiele problemów sprawia sam dobór funkcjonału regularyzującego jak również właściwy wybór parametru regularyzacji. Opracowana metoda pozwala na przesunięcie punktu pomiaru temperatury względnie głęboko w materiał czyli zbliżenie się do powierzchni rurociągu na której jest nieznan warunek brzegowy.

W przekonaniu recenzenta jest to osiągnięcie niezwykle wartościowe zarówno z teoretycznego jak również użytkarnego punktu widzenia.

Ważnym elementem w trakcie rozruchu turbiny jest rurociąg łączący kocioł z turbiną w którym na początku rozruchu zachodzą znaczne spadki temperatury pary powodujące powstawanie naprężeń termicznych. Monitorowane obciążenia cieplnego tego rurociągu jest zatem szczególnie ważnym problemem. Autor uwzględnia przy tym nieliniowe charakterystyki termiczne stali (w funkcji temperatury) użytej do wykonania rurociągu.

Celem pracy było opracowanie modelu matematycznego rurociągu parowego łączącego kocioł z turbiną (wprawdzie Autor czynił to dla danego typu kotła i turbiny lecz rozważania mają charakter ogólny). ***Istotą rozważań Autora było osiągnięcie najszybszego rozruchu kotła bez przekroczenia naprężeń termicznych przy zadanej szybkości zmian temperatury pary na wlocie do rurociągu.*** Pozwala to na wyznaczenie maksymalnych gradientów temperatur i w konsekwencji naprężeń termicznych.

Określenie dopuszczalnych szybkości nagrzewania czy ochładzania elementów kotła jest funkcją stanu początkowego kotła, to znaczy od jakiego stanu (zimnego, ciepłego czy gorącego) następuje rozruch. Autor opiera się przy tym na normie europejskiej i przepisach kotłowych, które bazują na założeniu quasi – stacjonarnego pola temperatury w ścianie elementu grubościennego w procesie nagrzewania czy chłodzenia. Obliczenia takie Autor przeprowadził dla elementów grubościennych takich jak : komory wlotowe i wylotowe z poszczególnych stopni przegrzewaczy pary pierwotnej i wtórnej, komora wlotowa i wylotowa podgrzewacza wody, walczak oraz trójnik na rurociągu pary świeżej. W celu wyznaczenia dopuszczalnych szybkości nagrzewania na podstawie wspomnianych przepisów przyjęto dodatkowe założenia:

- liczba rozruchów ze stanu zimnego $n = 2000$,
- współczynnik wnikania ciepła $\alpha = 1000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ dla pary, $\alpha = 3000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ dla wody,

- nadciśnienie dla rozruchu ze stanu zimnego $p_{min} = 0 \text{ MPa}$.

Obliczenia dopuszczalnych prędkości nagrzewania i chłodzenia dla walczaka dla różnych stanów rozruch-odstawienia z 3 stanów (zimnego, ciepłego i gorącego) Autor przedstawił na rys. 4-4, zaś dla komory ostatniego stopnia przegrzewacza pary świeżej na rys. 4-5 a dla komory ostatniego stopnia przegrzewacza pary wtórnej na rys. 4-6. Analiza przedstawionych przebiegów wskazuje na najmniejszą dopuszczalną prędkość nagrzewania-chłodzenia (ze stanu zimnego lub ciepłego) dla walczaka a dla stanu gorącego dla ostatniej komory ostatniego stopnia przegrzewacza pary. Te dopuszczalne szybkości stanowią podstawę do wyznaczenia krzywych rozruchowych dla różnych stanów początkowych.

Podstawą do rozwiązania głównego problemu modelowania pracy rurociągu łączącego kocioł z turbiną są dane techniczne kotła i parametry rurociągu stanowiące niezbędne dane do rozwiązania równań różniczkowych zachowania masy, pędu i energii (rozdział 6). Dalszym krokiem jest stworzenie modelu numerycznego rurociągu. Ważnym krokiem było sprawdzenie dokładności opracowanej metody numerycznej (z uwzględnieniem sposobu dyskretyzacji) przez porównanie z innymi metodami obliczeniowymi, najpierw analitycznymi i z różnymi wariantami izolacji zewnętrznej rurociągu. Odniesieniem porównawczym dla metody analitycznej były obliczenia wykonane z użyciem oprogramowania ANSYS CFX.

Przeprowadzenie obliczeń porównawczych z optymalnym wyborem siatki dyskretyzacyjnej świadczy o wysokich umiejętnościach Autora.

Opracowanie autorskiej metody wyznaczania pola temperatury stanowi podstawę do wyznaczenia rozkładu naprężeń termicznych w ścianie rurociągu w funkcji promienia, długości i czasu.

Modelowaniu zagadnień przepływu ciepła i naprężeń termicznych z wykorzystaniem pakietów CFD Autor poświęcił rozdział 8. Obliczenia zostały przeprowadzone zarówno dla stanu ustalonego jak i nieustalonego z uwzględnieniem rzeczywistej i idealnej izolacji zewnętrznej rurociągu. Pakiet CFD pozwolił na uwzględnienie warstwy przysciennej po stronie pary. Wiele obliczeń porównawczych Autor przedstawił analizując spadki ciśnień w rurociągu, rozkładów temperatur w różnych węzłach wzdłuż rurociągu dla różnych punktów czasowych jak również czasowe przebiegi naprężeń obwodowych na początku i końcu rurociągu. W tym kontekście przedstawiona autorska metoda symulacji nagrzewania rurociągu w czasie rozruchu jest zdaniem autora szczególnie cenna dla analizy rozkładu temperatury i dalej naprężeń termicznych w rurociągu w chwilach zarówno rozruchu zimnego jak również gorącego. Przedstawione przebiegi rozkładu naprężeń termicznych w rurociągu w przekroju wlotowym i wylotowym, na powierzchniach wewnętrznych i zewnętrznych dają obraz wpływu szybkości rozruchu na wielkości naprężeń termicznych. Bardzo ważnym elementem pracy jest weryfikacja metody autorskiej z danymi eksperymentalnymi. Przedstawione przebiegi porównawcze pokazują skuteczność opracowanej przez Doktoranta metody numerycznej.

Wspomniane już wyżej uwagi o zagadnieniach odwrotnych znajdują swoje potwierdzenie w obliczeniach. Należy pokreślić stabilność rozwiązania zagadnień odwrotnych wynikająca z zastosowania metody bilansowej. Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dla pola temperatury stanowi podstawę do ciągłego śledzenia (monitoringu) naprężeń termicznych.

Przeprowadzenie tych niełatwych obliczeń potwierdza wysokie umiejętności Autora również w zakresie korzystania z nowoczesnych narzędzi i opanowania pisania własnych programów komputerowych. Praca Autora jest napisana przejrzysto i zawiera znakomicie zestawioną literaturę również z uwzględnieniem szerokich osiągnięć krajowych.

3. Uwagi

Korzystanie z wyników pomiarowych niesie z sobą pewien błąd, który może istotnie wpłynąć na rozwiązanie zagadnienia odwrotnego. Dodatkowy błąd wynika z zastosowanej metody różnicowej.

Interesujące jest zatem zbadanie wpływu błędu pomiarowego temperatury, błędu zabudowy termoelementu jak również stosowanej metody różnicowej (zwykłej, metody elementów skończonych czy brzegowych, metody objętości skończonych). Zagadnienia te, jak sądzę będą przedmiotem dalszych badań Doktoranta.

4. Podsumowanie

Doktorant mgr inż. Karol Kaczmarek dokonał szczegółowej analizy literatury przedmiotu i aktualnych osiągnięć krajowych i zagranicznych co pozwoliło sformułować tezę swej pracy: *Wyznaczenie maksymalnych gradientów temperatur ścianki rurociągu na podstawie zadanej szybkości zmian temperatury czynnika na wlocie, umożliwi jak najszybszy rozruch kotła, bez obawy przekroczenia naprężeń dopuszczalnych.* Tezę tę w pełni poparł rozważaniami teoretycznymi, obliczeniowymi i eksperymentalnymi. Opracowanie optymalnych charakterystyk rozruchów kotła z różnych stanów początkowych z zachowaniem kryterium nieprzekraczania dopuszczalnych naprężeń termicznych w punktach krytycznych jest osiągnięciem *wybitnym* uzyskanym na podstawie własnej metody obliczeniowej o istotnym znaczeniu pozwalającym na zachowanie żywotności kotła. Doktorant opracował metodę stabilnego rozwiązania zagadnienia początkowego odwrotnego jak również zagadnienia odwrotnego typu Cauchy'ego. Zagadnienia te są szczególnie wrażliwe na błędy pomiarowe i numeryczne. W przekonaniu recenzenta już te wyniki predestynują Autora do wyróżnienia jego pracy.

Przeprowadzone badania jednoznacznie świadczą o wysokich umiejętnościach Doktoranta do prowadzenia badań naukowych zaś wnioski końcowe pracy wskazują na szereg problemów wyznaczających dalsze kierunki badań co świadczy o dużym potencjale naukowym Doktora. Wyniki realizacji pracy doktorskiej znajdują bezpośrednie zastosowanie w praktyce i poza uelastycznieniem pracy elektrowni, zachowaniem żywotności kotła i turbiny, mają również znaczenie ekologiczne, gdyż krótszy rozruch oznacza oszczędność paliwa.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr inż. Karola Kaczmarek spełnia w stopniu przekraczającym zwyczajowe jak również ustawowe - wymogi Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę do Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej o dopuszczenie mgr inż. Karola Kaczmarek do publicznej obrony recenzowanej pracy i równocześnie składam wniosek o jej wyróżnienie.

