

Prof. dr hab. inż. Janusz Kotowicz
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice
e-mail: janusz.kotowicz@polsl.pl

***Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Trawińskiego
pt. „Analityczno-aproksymacyjny model matematyczny bloku gazowo-parowego
dla celów diagnostyczno-ewaluacyjnych”***

A. Wprowadzenie

Elektrociepłownie gazowo-parowe posiadają szereg powszechnie znanych zalet: wysoką sprawność konwersji energii chemicznej paliwa, bardzo niskie emisje substancji szkodliwych dla środowiska (w przypadku emisji CO₂ nawet poniżej 330 kgCO₂/MWh) i stosunkowo niskie nakłady inwestycyjne. Ważne tutaj są także w dobie zwiększenia OZE w systemach energetycznych krótkie czasy rozruchu.

Wykorzystaniu gazu w energetyce krajowej nie sprzyja struktura cen paliw stałych do gazowych. Sytuacja ta jednak zmienia się dynamicznie wraz z wprowadzeniem nowych instrumentów ekonomicznych: w tym certyfikatów wysokosprawnej kogeneracji, handlu emisją CO₂ czy też wprowadzeniem rynku mocy. Umiejętność wyznaczania charakterystyk termodynamicznych i ekonomicznych takich układów jest ważna z punktu widzenia analizy ich optymalizacji pracy.

Opracowane modele matematyczne bloku gazowo-parowego powinny umożliwiać symulację pracy przy zmiennym obciążeniu (w warunkach zmienionych) i prowadzić wielokryterialną ocenę osiągnięć układu.

Uwzględniając powyższe tematykę pracy mgr inż. Pawła Trawińskiego pt. „Analityczno-aproksymacyjny model matematyczny bloku gazowo-parowego dla celów diagnostyczno-ewaluacyjnych” należy uznać za ważny zarówno z poznawczego jak i użytecznego charakteru prac naukowo-badawczych w dyscyplinie naukowej Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

B. Zakres rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Pawła Trawińskiego zwiiera łącznie 210 stron, na które składa się 9 numerowanych rozdziałów, streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów, literatura i złącznik nr 1.

W krótkim wprowadzeniu do pracy Autor przedstawia elektrociepłownię gazowo-parowe, w szczególności EC Żerań, wraz z jej schematem technologicznym. Rozdział drugi to cel i zakres pracy. Celem pracy jest wypracowanie analityczno-aproksymacyjnego podejścia do opracowania modelu matematycznego złożonej instalacji energetycznej na przykładzie bloku gazowo-parowego Elektrociepłowni Żerań. Rozdział trzeci zawiera ogólne informacje o modelowaniu matematycznym układów gazowo-parowych, w szczególności związanych z turbozespołami gazowymi, kotłami odzyskiwanymi i turbozespołami parowymi. Podstawowe informacje o sposobach modelowania czynników roboczych przedstawiono w rozdziale 4.

W rozdziale piątym mgr inż. Paweł Trawiński opisuje model matematyczny turbozespołu gazowego M701F5.

Zawiera on modele cząstkowe:

- Zespołu filtrów wlotowych
- Kierownicy wlotowej IGV
- Układu przepływowego sprężarki osiowej
- Chłodnicy powietrza chłodzącego TCA
- Układu paliwa gazowego
- Zespołu komór spalania
- Czterostopniowej turbiny gazowej.

Model turbozespołu gazowego (i jego modele cząstkowe) wykorzystuje równania bilansowe masy i energii, równania wymiany ciepła przy zmiennym obciążeniu oraz zależności empirycznych ustanowionych na podstawie dostępnych danych eksploatacyjnych. Wybór najlepszych do modelu matematycznego równań Autor dokonuje w oparciu o zależność:

$$\Sigma(X_{dane} - X_{model})^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

Prawidłowość wyboru potwierdza wyznaczony współczynnik determinacji R^2 , średni błąd bezwzględny MAE i średni błąd względny MRE.

W przypadku sprawności w miejsce zależności (1) Autor stosuje:

$$|(\eta_{spr})_{charakterystyka} - (\eta_{spr})_{bilans}| < 10^{-6} \quad (2)$$

W rozdziale tym mgr inż. Paweł Trawiński sporządził indywidualne charakterystyki przepływowe i sprawnościowe sprężarki i turbiny gazowej. W modelach uwzględnił algorytmy zaimplementowane w sterowniku nadrzędnym jak i BOT.

Model matematyczny kotła zawiera rozdział 6.

W modelach cząstkowych wykorzystywano analityczno-empiryczny model wymiany ciepła przy zmiennym obciążeniu oparty o średnią logarytmiczną różnicę temperatur.

Rozdział 7 zawiera model matematyczny turbozespołu ciepłowniczego DST-S10. Model cząstkowy dotyczy 6 grup stopni turbinowych opisanych różnymi postaciami równania Flügela-Stodoli i zależnościami empirycznymi do określenia sprawności wewnętrznej. Ponadto zamodelowano: stację recyklingowo-schładzającą parę technologiczną, wymienniki: podturbinowy, ciepłowniczy i pseudokondensacji oraz zbiornik kondensatu.

Rozdział 8 zawiera weryfikację wyników wygenerowanych w modelu matematycznym przy wykorzystaniu danych pomiarowych z pierwszego roku eksploatacji bloku gazowo-parowego. Ocenę wyników z modelu przeprowadzono w oparciu o 3 wskaźniki statystyczne: współczynnik determinacji R^2 , średni błąd bezwzględny i względny (MAE, MRE). Dla turbozespołu gazowego $R^2 \geq 99,3\%$, $MRE \leq 0,54\%$ dla kotła odzyskowego $R^2 \geq 99,1\%$ $MRE \leq 1,3\%$, dla turbozespołu parowego $R^2 \geq 98,27\%$ $MRE \leq 2,15\%$.

Wykorzystując wygenerowane wyniki mgr inż. Paweł Trawiński wyznaczył szereg charakterystyk turbozespołu gazowego, kotła odzysknicowego i turbozespołu parowego, a także obszary możliwej eksploatacji bloku gazowo-parowego.

Rozdział 9 zawiera podsumowanie pracy.

Spis literatury do pracy jest bardzo obszerny i zawiera 190 pozycji.

C. Ocena rozprawy

1. Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest ważna i interesująca. Praca jest napisana w większości przejrzysto i podzielona na logiczne, wynikające z układu pracy rozdziały. Wymagała od Autora dobrego opanowania zagadnień teoretycznych, związanych z dyscypliną inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, przeprowadzenia skomplikowanych obliczeń numerycznych, opracowania i analizę wyników.
2. Mgr inż. Paweł Trawiński w pracy opracował analityczno-aproksymacyjny model matematyczny bloku gazowo-parowego (na przykładzie Elektrociepłowni Żerań w Warszawie) dla celów diagnostyczno-ewaluacyjnych.

3. W/w model zawiera modele cząstkowe kolejnych elementów układu technologicznego analizowanej jednostki, w szczególności: turbozespołu gazowego M701F5, trójprężnego kotła odzysknicowego z przegrzewem wtórnym, turbozespołu parowego upustowo-ciepłowniczego DST-S10.
4. Z kolei każdy z wymienionych turbozespołów i kocioł odzyskowy posiadał modele cząstkowe swoich elementów technologicznych. I tak w przypadku turbozespołu gazowego było ich 8 i obejmowały: filtry wlotowe, kierownicę wlotową, sprężarkę osiową, chłodnicę powietrza, układ paliwa gazowego, komory spalania, część ekspansyjną turbiny. W przypadku kotła odzyskowego Modele cząstkowe obejmują kolejno część niskoprężną (NP), średnioprężną (SP) i wysokoprężną (WP) w tym podgrzewacze wody, parowniki i walczaki, przegrzewacza pary, stacji schładzaczy międzystopniowych. W modelu kotła uwzględniono także ekonomizery wody sieciowej i paliwa. W przypadku turbozespołu DST-S10 modele cząstkowe dotyczyły 6 grup stopni turbinowych, stacji redukcyjno-schładzającej, wymienników: podturbinowego, ciepłowniczego i pseudokondensacji oraz zbiornika kondensatu.
5. Dla opracowania w/w modeli Autor w pracy napisał i wykorzystał szereg równań bilansowych masy i energii, równań przelotności Flügela–Stodoli, zależności określających sprawności wewnętrzne grupy stopni turbin (gazowej i parowej), linii ekspansji w turbinach, modeli wymiany ciepła w tym także przy zmiennym obciążeniu (w warunkach zmienionych).
6. Weryfikacja opracowanego przez mgr. inż. Pawła Trawińskiego analityczno-aproksymacyjnego modelu potwierdza jego pełną przydatność dla obiektu Elektrociepłowni Żerań. Weryfikację Autor dokonał porównując dane pomiarowe z eksploatacji bloku z uzyskanymi z obliczeń przy użyciu wskaźników statystycznych.
7. Do najważniejszych rezultatów pracy mgr inż. Paweł Trawiński należy zaliczyć także opracowanie:
 - analitycznego modelu matematycznego własności termodynamicznych i transportowych czynników roboczych w części gazowej
 - indywidualnych charakterystyk przepływowych i sprawnościowych sprężarki osiowej
 - modelu ekspansji gazów spalinowych w układzie przepływowym turbiny gazowej
 - sposobu wyznaczania mocy teoretycznej i sprawności wewnętrznej stopni turbinowych z otwartymi układami chłodzenia

- algorytmów obliczeniowych BOT dla turbozespołu gazowego
 - modelu linii ekspansji w turbozespołe parowym
8. Program komputerowy zaimplementowany na podstawie opracowanego przez Autora modelu matematycznego jest w trakcie wdrożenia PGNiG TERMIKA S.A.. Aplikacja zgodnie z przyjętym celem będzie wykorzystana jako narzędzie wspomagające planowanie pracy bloku gazowo-parowego w perspektywie krótko i długo terminowej.

D. Uwagi krytyczne i dyskusyjne i drobne

w.g – wiersz od góry strony, *w.d.* – wiersz od dołu strony

- Na stronie 36 Autor podaje „Temperatura gazów spalinowych na wlocie sięga 1500°C” -czy to chłodzi o TIT?
- Str. 37, 3w.d – określenie „nabór obciążenia” nie jest najwłaściwsze (powtarza się to w innych miejscach)
- Na stronie 57 jest rys. 5.11, a następnie na stronie 59 jest również rys. 5.11 (ale inny)
- W czym należy podstawiać do równania modelowego z tab. 5.4 Z_{IGV} (czy w % czy 0-1), aby otrzymać strumień
- Proszę pokazywać nominalny strumień powietrz wlotowego z tab. 5.5 na rysunku 5.5. Jak się to ma do rys. 5.6
- Czy próbowano porównać ciśnienie wyznaczone zależnością (5.15) z wyznaczoną zależnością odpowiadającą (inny współczynnik w liczniku) 5.11
- Czy ciśnienie p_a 9 (str. 48-49) jest znane (z DCS - patrz zal. 5.11) czy też wyznaczane (zal. 5.18), lub obliczane interakcyjnie
- Czy sprawność komory spalania $\eta_{Ks}=99.6\%$ - bez względu na (str. 69) obciążenie jest stała
- Jaki rodzaj (linii) krzywej reprezentuje fragment e6-e7 na rys. 5.19 ($p=$ idem, $p^*=$ idem ?)
- Str. 100, w opisie tabeli 6.2 napisano: „przykładowe wartości współczynników wymiany ciepła w równaniu 6.8” powinno być „przykładowe wartości współczynników wymiany ciepła w równaniu 6.4”
- Na str. 106 w tabeli 6.3 podano w dwóch przypadkach współczynniki w postaci A/B (np. 20.25/69.13) proszę to wyjaśnić (zinterpretować)
- Str. 121, 17 w.g – jest „Stosunek wskazanych strumieni jest porównywalny” – co to oznacza?

- Najmniejsze współczynniki determinacji i największy średni błąd względny MRE (~95,6% i 2,24%) uzyskano dla równania przelotności części MP2 turbozespołu parowego (str. 136) – czy tak jest – proszę to zinterpretować
- Str. 148 czy występująca w równaniu (7.66) ΔP_{el} i w (7.67) ΔP_{TPel} oznaczają tą samą wielkość

E. WNIOSEK KOŃCOWY

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Pawła Trawińskiego pt. „*Analityczno-aproksymacyjny model matematyczny bloku gazowo-parowego dla celów diagnostyczno-ewaluacyjnych*” zawiera sformułowanie ważnych w energetyce zadań badawczych, ich rozwiązanie i dyskusję wyników.

W opinii końcowej chcę także podkreślić złożoność badanych problemów i związaną z tym konieczność przeprowadzenia żmudnych oraz pracochłonnych modeli, obliczeń i pomiarów. Autor w ich przeprowadzeniu wykazał się bardzo dobrą wiedzą i szeroką skalą umiejętności posługiwania się złożonymi technikami modelowania, obliczeń i pomiarów eksperymentalnych, jak i umiejętnościami opracowania i interpretacji wyników oraz szerokiej ich dyskusji.

Na uwagę zasługuje wdrażanie programu komputerowego zbudowanego na podstawie opracowanego modelu matematycznego w PGNiG TERMIKA S.A. Poziom merytoryczny rozprawy tworzy logicznie przemyślaną i spójną całość potwierdzającą dojrzałość Doktoranta do prowadzenia badań naukowych, w tym także z zakresie samodzielności i pracowitości.

Uważam, że opiniowana praca mgr inż. Pawła Trawińskiego w pełni spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach i zasługuje na pozytywną opinię. Wobec powyższego stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Uwzględniając ponadto fakt, że mgr inż. Paweł Trawiński jest samodzielnym Autorem czterech publikacji związanych z pracą oraz, że praca zawiera interesujące i poszerzające wiedzę rozwiązania przedstawione szczególnie powyżej w ocenie rozprawy w punktach 6-8 proszę o rozważenie wyróżnienia.

Gliwice, 26.01.2024r.

Janusz Kotowicz

