

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

Adres domowy:
ul. Sikorskiego 21
44-120 Pyskowice

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Kołodziejaka
pt. „Optymalizacja wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w elektrociepłowni
gazowo-parowej współpracującej z kotłami węglowymi i akumulatorem ciepła”**

A. Wprowadzenie

Elektrociepłownie gazowo-parowe posiadają szereg powszechnie znanych zalet: wysoką sprawność konwersji energii chemicznej paliwa, bardzo niskie emisje substancji szkodliwych do środowiska 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. W konsekwencji istotnym jest umiejętność łączenia technologii opartych na gazie i węgla. Umiejętność wyznaczania charakterystyk termodynamicznych i ekonomicznych takich układów jest ważna z punktu widzenia ich optymalizacji. Uwzględniając to, tematykę pracy mgr inż. Przemysława Kołodziejaka pt. „Optymalizacja wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w elektrociepłowni gazowo-parowej współpracującej z kotłami węglowymi i akumulatorem ciepła” należy uznać za ważną, zarówno z poznawczego jak i utylitarnego charakteru prac naukowo-badawczych.

B. Zakres rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Przemysława Kołodziejaka zawiera łącznie 166 stron, na które składa się 8 numerowanych rozdziałów, streszczenie w języku polskim i angielskim, spisy: treści, rysunków, tabel i ważniejszych oznaczeń oraz 2 załączniki.

We wstępie do pracy (rozdział 1) Autor podkreśla, że do napisania pracy wykorzystał ponad 20-letnie doświadczenie w prowadzeniu elektrociepłowni.

Rozdział 2, to bardzo szeroki prawie 17 stronicowy przegląd literatury. Pozwala on m.in. Autorowi na stwierdzenie, że brakuje w literaturze przedmiotu opisu sposobu operacyjnego sterowania elektrociepłownią, powodującego maksymalizację zysku, w ramach istniejących ograniczeń prawnych, technicznych i rynkowych. Praca ma tę lukę w literaturze wypełnić.

W Rozdziale 3-cim Autor przedstawia cel, zakres i tezę pracy, która brzmi: optymalne sterowanie elektrociepłownią, składającą się z turbin gazowych, kotłów odzyskowych, kotłów węglowych i akumulatora ciepła pozwala na maksymalizację zysku brutto na prawnie uwarunkowanym rynku energii.

Rozdział 4-ty jest obszerny 32-stronicowy i zatytułowany jest: Model elektrociepłowni. Rozdział ten w istocie zawiera 2 modele tj.: punkt 4.2 – Model matematyczny EC (będący w istocie modelem ekonomicznym) oraz punkt 4.3 – „Model termodynamiczny elektrociepłowni gazowo-parowej”.

Pierwszy model dotyczy elektrociepłowni gazowo-parowej współpracującej z kotłami węglowymi i akumulatorem ciepła, drugi tylko EC gazowo-parowej. W rozdziale 4.2 mgr inż. Przemysław Kołodziejak szczegółowo charakteryzuje wszystkie rodzaje kosztów i przychodów dla badanego układu, co pozwala mu określić i następnie optymalizować zysk netto. Do zadania optymalizacyjnego wprowadza szereg ograniczeń, w tym: mocy cieplnej (ze strony producenta - elektrociepłowni i odbiorcy – systemu ciepłowniczego), mocy elektrycznej (od temperatury i ciśnienia otoczenia), poboru gazu oraz ograniczenia prawne. Model termodynamiczny jest modelem uproszczonym.

Rozdział 5-ty zawiera wyniki symulowanej optymalizacji pracy elektrociepłowni i ich analizę, jest bardzo obszerny – zawiera bowiem 45 stron. W punkcie 5.1 Autor

pokazuje i opisuje schemat technologiczny EC Siedlce, na którym zaznaczono podstawowe parametry maszyn i urządzeń, a także zilustrował włączenia akumulatora ciepła w system ciepłowniczy. W punkcie 5.2 pokazano charakterystyki pracy badanej EC w roku 2016. Obejmują one głównie produkcję mocy, ciepła, pracę akumulatora ciepła, spalane strumienie paliwa i sprawności. Uzupełnione są o wykresy temperatur zewnętrznych w czasie. Weryfikacja krzywych korekcyjnych podana przez producentów turbin jest ważnym elementem rozdziału 6 (punkt. 5.4). Na podstawie wyników badań Autor wyznacza równania opisujące moc turbin gazowych i strumienie spalanego gazu w funkcji temperatury zewnętrznej. Pozwala to mu porównać opracowane charakterystyki z danymi producentów. Ponieważ różnice są znaczące, w dalszych badaniach P. Kołodziejak wykorzystuje własne charakterystyki. Wykorzystując metodologię, pokazaną w rozdziale 4 Autor w punkcie 5.5 przedstawił optymalizację zysku (tj. ekonomiczną) EC Siedlce. Pokazuje tutaj dwa rodzaje optymalizacji: dzienną (dla wybranych dni 2016r.) i roczną (dla 2016r.). przedstawia tutaj także przebiegi mocy: elektrycznej i cieplnej oraz zużycie paliwa w czasie. Pozwala to mu określić przychody i koszty, i w konsekwencji określić zysk. Porównuje wielkości rzeczywiste i symulowane, wnioskuje o możliwość poprawy zysku. Punkt 5.6 zawiera założenia i obliczenia termodynamiczne elektrociepłowni gazowo-parowej w EC Siedlce. Wyniki obliczeń mocy, strumienia gazu i sprawności są zadawalające zgodne z pomiarami. Duże różnice są w strumieniu spalin i temperaturze wylotowej z turbiny gazowej. Punkt kończy uproszczony wykres T-S i wykres Sankeya dla bloku gazowo-parowego. W punkcie 5.7 mgr inż. Przemysław Kołodziejak pokazuje szczegółową strukturę kosztów i przychodów w EC Siedlce (szczególnie dokładnie charakteryzuje koszt paliwa gazowego i emisji CO₂). Jest to punktem wyjścia do opracowania metodologii sposobu wyceny instrumentu finansowego – jakim jest rynek mocy. Dla EC Siedlce pokazuje przychody za dostawę mocy do systemu w zależności od ceny: zakupu gazu, uprawnień do emisji CO₂, sprzedaży energii elektrycznej.

Rozdział 6 zatytułowany jest „Wyniki rzeczywistej pracy elektrociepłowni i ich analiza”. Autor analizuje tu wpływ zmiennych modelu ekonomicznego EC na jej zysk. Dotyczy to optymalizacji: wytwarzania energii elektrycznej i ciepła (PES, sprawność całkowita), krótkookresowej sprzedaży energii elektrycznej, krótkookresowego kosztu

zakupu gazu, kolejności uruchamiania źródeł. Przedstawiana optymalizacja dotyczy okresu krótszego niż rok, roku i wielu lat. W punkcie 6.9 Autor podsumowuje rozdział formułując „Zasady optymalizacji pracy elektrociepłowni”.

Siódmy rozdział zawiera obszerne podsumowanie i wnioski.

Spis literatury (rozdział 8) zawiera 157 pozycji, w tym 16 adresów internetowych. Pracę kończą:

- a) Załącznik nr 1 – Model zużycia gazu i wytwarzania energii elektrycznej przez turbiny gazowej TG-1, TG-3, TG-4
- b) Załącznik nr 2 – Przykład obliczeń

C. Ocena rozprawy

1. Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest ważna i interesująca. Praca jest napisana przejrzysto i podzielona na logiczne, wynikające z układu pracy rozdziały. Wymagała od Autora dobrego opanowania zagadnień teoretycznych, związanych zarówno z energetyką jak i ekonomią oraz zagadnień związanych z opracowaniem, dyskusją i analizą wyników pomiarów.
2. Opracowanie własnych krzywych korekcyjnych (mocy elektrycznej i strumienia spalanego gazu w funkcji dla Turbin Gazowych Titan 130 i Taurus T70 spalanego gazu w funkcji temperatury otoczenia) jest ważne ze względu na dokładność wyznaczenia charakterystyk pracy EC Siedlce. Autor wykazał, że korzystanie z krzywych korekcyjnych producenta turbin obarczone jest tutaj dużym błędem.
3. Mgr inż. Przemysław Kołodziejak w dysertacji opracował model matematyczny (ekonomiczny) elektrociepłowni gazowo-parowej współpracującej z kotłami węglowymi. Sformułowaną przez Niego funkcją celu był zysk operacyjny netto elektrociepłowni, który zawierał 16 rodzajów przychodów oraz 29 rodzajów kosztów. Optymalizację funkcji celu sprowadzono do maksymalizacji przychodów i minimalizacji kosztów przy zdefiniowanych ograniczeniach technicznych i prawnych.

4. Wykorzystując opisany wyżej 3 model Autor przeprowadza optymalizację tzw. dzienną (jednodniową) i roczną. Porównanie zysku obliczonego na podstawie danych pomiarowych (rzeczywistych EC) i optymalizowanego modelu wskazuje na istotne możliwości jego zwiększania. W ten sposób praca ma istotny walor aplikacyjny.
5. Opracowanie algorytmu wyceny instrumentu finansowego jakim jest cena ofertowa za moc elektryczną dla tzw. rynku mocy zasługuje na szczególne podkreślenie. Autor pokazał tu wpływ ceny: uprawnień do emisji CO₂, energii elektrycznej, gazu na wielkość ceny za dostawę mocy przez EC Siedlce.
6. Autor w pracy proponuje bieżącą (tzw. krótkookresową) optymalizację pracy elektrociepłowni, opartą o maksymalizację przychodu ze sprzedaży energii elektrycznej na rynku dnia bieżącego RDB czy działaniach opisanych w punkcie 7 (niżej).
7. Krótkookresowa optymalizacja kosztu zakupu gazu jest propozycją Autora dotychczas nie stosowaną w literaturze przedmiotu. Jej zastosowanie oparte o przychody (koszty) uniknięte i doskonała znajomość grup taryfowych gazu i sposobów jego zakupu (na rynku terminowym towarów) i na rynku spot doprowadza do obniżenia kosztów zakupu gazu.

D. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

- Str. 40 – rys. 4.3 powinien być w tekście starannie opisany
- Str. 46 proszę o wyjaśnienie zależności (4.33) i (4.34) – po co je wprowadzono
- Str. 50 Autor podaje, że średni roczny koszt zapasów węgla wynosi 0,5% ÷ 0,8% wartości kupionego węgla. Przy jakiej stopie procentowej wielkość tę wyznaczono (przed rys. 4.5)

- Str. 51÷52 Równanie (4.60) i (4.61) nie jest spójne z równaniem (4.62) lub (4.63) – w pierwszych dwóch występuje 1 składnik, w drugich dwóch – występują 2 składniki, zależne od mocy zamówionej)
- Str. 53 W zależności (4.65) wielkość C_{mz} nie została określona – proszę to uzupełnić (jest ona zależna od źródła i dystrybucji). Wielkość ta (C_{mz}) występuje także w równaniach (4.69) i (4.70)
- Optymalizację Autor przeprowadza poprzez maksymalizację zysku netto. Sprowadza ją do maksymalizacji przychodów (P) i minimalizacji kosztów (K). Jest to słuszne przy założeniu (określeniu) zmiennych niezależnych występujących w strumieniach P i K. Autor tylko niektóre z nich wymienia na stronie 56, brak jest tutaj pełnej specyfikacji (Zagadnienie nie jest bowiem proste. Autor słusznie tutaj wymienia jednostkowe ceny zakupu gazu i węgla – a nie koszt zakupu węgla)
- Na stronie 58 napisano: Moc elektryczna turbiny gazowej spada z 9,2 MW_e do 5,8 MW_e wraz ze wzrostem temperatury powietrza zewnętrznego z -20°C do +40°C tj. o 27 % (Rys. 4.6). Podano tutaj błędnie spadek mocy 27% zamiast 37%.
- W tekście pracy nie odniesiono się do rys. 4.7 (str. 59)
- W tekście należało podać ciśnienie i temperaturę dla krzywych korekcyjnych z rys. 4.7 i rys. 4.8 (zapewne wg ISO 15°C, 1,01325kPa) (tak jak podano na rys. 4.10 i 4.11)
- Na str. 65 napisano: „Moc zainstalowana wynosi 34MW_i oraz 36 MW_e(2x 13,5MW_e + 8,2MW_e)”. Suma wynosi 35,2 MW_e, ponadto na rys. 4.12 zaznaczono moc turbiny parowej 9MW_e – proszę to wyjaśnić (a na rys. 4.14 – 8,2MW_e).
- Obliczenia przedstawione w punkcie 4.3.2 (str. 67), Chemiczny model spalania) są uproszczone. Bardziej dokładne można przeprowadzić

wykorzystując gotowe programy np. GATE CYCLE i biblioteki turbin tam zawarte.

- Omawiając rys. 5.3 (str. 71), Autor napisał: „*Zmiany ciśnienia atmosferycznego, z punktu widzenia bloku g-p... niewiele wpływały na wzrost lub spadek mocy elektrycznej*”. Komentarz: jeśli przyjąć, że charakterystyka mocy turbiny TG3 i TG4 jest podobna do TG1 (rys. 4.8) to te zmiany sięgają 5%.
- Omawiając rys. 5.9 (str. 74) Autor napisał: „*Na rysunku jest to widoczne w postaci stabilnych mocy Q_1 ; Q_2 ; Q_4* ”. Komentarz: Q_1 – nie jest stabilne (tak ja widzę).
- Proszę o wyjaśnienie różnic w opisie pracy akumulatora ciepła ze strony 69 i wynikających z rys. 5.10-5.12 (str. 75 i 76) (dotyczy mocy rozładowania)
- Proszę o wyjaśnienie różnic w przychodach i kosztach wyznaczonych na podstawie danych technicznych (termodynamicznych) i księgowych podanych na str. 78 (dotyczy przychodów ze sprzedaży).
- W rozdziale 5.4.2 (rys. 5.23) trudno się zorientować czego przedstawione krzywe dotyczą (t.g; tg + tg; 2tg + t.p - ?). Cały ten punkt jest mało przejrzysto napisany (np. powyżej 12MWe oraz 28,9MWe następuje skokowy spadek zużywanego gazu; zależności na rys. 5.28 w funkcji numeru danych pomiarowych?)
- Co oznaczają brązowe linie na osi x na rys. 5.25 - 5.27
- Proszę o przejrzystą interpretację wyników pokazanych na np. rys. 5.31 i 5.36 dotyczącej tzw. dziennej optymalizacji. Skąd wynikają wyższe przychody w symulacji niż pomiarze. Na rysunkach trudno znaleźć symulowaną moc. Rozdział 5.5.2 (optymalizacja roczna) też powinien być szerzej i bardziej wyczerpująco przedstawiony.
- Jak zdefiniowano sprawność spalania gazu podaną w tabeli 5.5 (str. 98)
- W kilku miejscach w pracy np. Tab. 5-6 (str. 98) Autor używa określenia raz „ciepło w paliwie”, następnie „moc w paliwie”.

Prawidłowo powinno być „energia chemiczna zawarta w paliwie” (np. wg LHV).

- Nieuwzględnienie w obliczeniach termodynamicznych (rozdział 5.6) powietrza chłodzącego układ przepływowy powoduje błędy., które Autor zauważa. Aby ich uniknąć (lub minimalizować) należało:
 - a) Określić na podstawie podawanych w literaturze przedmiotu danych lub formuł ilość powietrza kierowanego do chłodzenia w zależności od temperatury spalin na wlocie do turbiny gazowej (wg mojej oceny dla podanych parametrów turbiny będzie to 8-12%) lub
 - b) Skorzystać z bibliotek obliczających turbiny gazowe w dostępnych programach np. GATE CYCLE, Epsilon, Thermoflow.

E. Uwagi szczegółowe

- Str. 16 10wd (10 wiersz od dołu) Jest nale7za – powinno być Należą
- Str. 26 3wd Jest „z lematu”, powinno być „schematu”
- Str. 28 12wd Błędnie napisano „opłaca się o opłacalności budować”
- Str. 31 9wg Jest „temperatury świeżej” – ma być „temperatury pary świeżej”
- Str. 33 4wd Jest „system wspierania kogeneracji kończy się w 2018r” – powinno być „skończył się w 2018 roku”
- Str. 52 Jest „od mocy zamówionej przez” powinno być „od mocy zamówionej przez niego”
- Rys. 5.19, str. 80 Jest niewłaściwie opisany, to samo dotyczy rys. 5.22 (str. 81)
- Tab. 5.15 str. 105 Błędna jednostka stosunku strumienia paliwa do powietrza. Jest kg powietrza/kg paliwa a powinno być kg paliwa/kg powietrza
- Str. 120 W równaniu 5.6 jest C_{ee} powinno być C_w

- Str. 125 3wg Jest „równanie przychodów (4.58) powinno być „równania przychodów” (4.59)
- Str. 126 (w połowie strony) Jest „świadcstw P_{wpm} (4.66) powinno być „świadcstw P_{wpm} (4.67)
- Brak odwołań w tekście do załączników

F. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana *mgr inż. Przemysława Kołodziejaka* pt. „**Optymalizacja wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w elektrociepłowni gazowo-parowej współpracującej z kotłami węglowymi i akumulatorem ciepła**”, 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 i obliczeń. Autor w ich przeprowadzeniu wykazał się bardzo dobrą wiedzą i szeroką skalą umiejętności posługiwania się złożonymi technikami modelowania i obliczeń, jak i umiejętnościami opracowania i interpretacji wyników oraz szerokiej ich dyskusji.

Na uwagę zasługuje umiejętne łączenie przez Autora rozważań termodynamicznych (energetycznych) z zagadnieniami zarówno ekonomicznymi jak i prawniczymi.

Poziom merytoryczny rozprawy tworzy logicznie przemyślaną i spójną całość potwierdzającą dojrzałość Doktoranta do prowadzenia badań naukowych, w tym także w zakresie samodzielności i pracowitości.

Uważam, że opiniowana praca mgr inż. Przemysława Kołodziejaka 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.

Gliwice, 25.04.2019r.

Janusz Kotowicz