

dr hab. inż. Marek Jaszczur, prof. AGH

Kraków, 24.01.2020

Katedra Podstawowych Problemów Energetyki
Wydział Energetyki i Paliw
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
30-059 Kraków, al. A. Mickiewicza 30
e-mail: jaszczur@agh.edu.pl
Tel: 126172657, Fax: 126173767

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jarosława Króla pt. „Analiza energetyczno-ekonomiczna hybrydowej jednostki kogeneracyjnej z wykorzystaniem modelowania matematycznego”

I. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska dotyczy modelowania oraz analizy energetyczno-ekonomicznej hybrydowej elektrociepłowni w różnych układach konfiguracyjnych. Doktorant kontynuuje tym samym, badania prowadzone na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki przez profesora Jana Talera i promotora rozprawy profesora uczelni Pawła Ocłonia. Badane zagadnienie dotyczy energetyki i wiąże ze sobą zależności energetyczne i ekonomiczne. Analizie poddano wpływ konfiguracji poszczególnych jednostek wytwórczych, takich jak kotły parowe połączone z turbiną upustowo-kondensacyjną, kotły wodne oraz silniki gazowe, na efektywność energetyczną jak i ekonomiczną układu. Przy czym w pracy, w przeciwieństwie do ogólnych trendów panujących na rynku zaproponowano podejście bezinwestycyjne, umożliwiające maksymalizację zysków i zapewnienie efektywnej pracy istniejących jednostek. W badanej hybrydowej elektrociepłowni, energia elektryczna i ciepło są produkowane w trzech niezależnych źródłach, co daje duże możliwości optymalizacji jej pracy.

Przeprowadzone, przez Autora rozprawy, rozważania i eksperymenty numeryczne dotyczyły trzech układów energetycznych średniej wielkości, złożonych z (i) trzech kotłów parowych o wydajności 50t/h pary świeżej, turbiny upustowo-kondensacyjnej o mocy 20MW_e; (ii) dwóch kotłów wodnych o mocy 25MW oraz układu (iii) w którym zaimplementowano dwa silniki gazowe o mocy elektrycznej 8,4MW_e. Dla analiz przyjęto niezwykle wymagające okresy w ciągu roku, charakteryzujące się niewielkimi średnimi obciążeniami cieplnymi i równocześnie znacznymi wahaniami amplitudy pod względem zapotrzebowania na moc tj. okresy stanowiące przetom zimy/wiosny oraz jesieni/zimy. Niewielkie zapotrzebowanie na moc cieplną i znaczne amplitudy, stanowią największe wyzwanie dla układów energetycznych, wymuszając pracę urządzeń na najmniejszych dostępnych mocach (tzw. minima technologiczne) co najczęściej skutkuje znacznym obniżeniem opłacalności produkcji i spadkiem sprawności pracy całego układu. W rozprawie,

przedstawiono również szczegółowo porównawczą analizę pracy dla systemów zasilanych węglem kamiennym i opartych o kotły parowe oraz turbinę parowo-upustową lub kotły wodne. Dla układów tych przeprowadzono szereg symulacji wykazując, że w warunkach małego zapotrzebowania na ciepło, większą opłacalnością charakteryzują się układy z kotłami wodnymi. W rozdziałach stanowiących główną część pracy, przeprowadzono szczegółowe analizy energetyczno-ekonomiczne, dla układów wyposażonych w dwa dodatkowe kogeneracyjne silniki gazowe. W oparciu o wyniki obliczeń uwzględniające pięć różnych scenariuszy wzrostu cen uprawnień do emisji dwutlenku węgla oraz przychodów z subsydiowania produkcji energii elektrycznej tzw. „żółtymi certyfikatami”, wykazano słabość technologii energetycznych opartych na węglu kamiennym. Zidentyfikowano szczególną wrażliwość elektrociepłowni na ceny praw do emisji CO₂, którą można znacząco obniżyć w przypadku kogeneracji zasilanej gazem ziemnym.

Tematyka rozprawy jest niezwykle aktualna i ważna wobec zmieniającej się w szybkim tempie sytuacji na rynku energetycznym. Opracowane modele i algorytmy, jak i zaproponowana metodologia, mogą w oczywisty sposób przełożyć się na aspekty poznawcze oraz aplikacyjne. Zaproponowane narzędzie, umożliwiające śledzenie efektywności chwilowej i kosztów, może stanowić znakomite uzupełnienie i wspomaganie dla procesów decyzyjnych.

Skala trudności podjętych badań, ze względu na analizę niezwykle dużych i złożonych układów oraz zależności energetyczno-ekonomicznych, jest duża i odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskim.

Rozprawę należy od strony formalnej zakwalifikować do dziedziny nauk inżynierijno-technicznych i dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

II. Struktura i ocena wartości naukowej

Opiniowana rozprawa została wykonana na Politechnice Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Energetyki pod opieką naukową dr hab. inż. Pawła Ocfonia, prof. PK. Została zredagowana w języku angielskim i liczy 99 stron. Składa się z aż 12 rozdziałów (w tym bibliografia i streszczenie). Bibliografia zawiera 57 pozycji które niejednokrotnie zostały omówione dosyć szczegółowo w tekście. Warto podkreślić, że wiele pozycji opisuje najnowsze osiągnięcia w dziedzinie rozwiązań i modelowania układów energetycznych. Wśród publikacji znalazły się również 3 pozycje Autora rozprawy, wydane w bardzo dobrym czasopiśmie Energy Conversion and Management, w których występuje On jako główny Autor publikacji. Na uwagę zasługuje również fakt cytowania prac z krajowych ośrodków, co świadczy o dobrej wiedzy Autora na temat realizowanych w Polsce badań.

Podstawowym celem rozprawy, zgodnie z informacjami podanymi w rozdziale 3.1, było opracowanie modelu matematycznego hybrydowej elektrociepłowni. Ponadto w rozdziale 3.2 zapisano, że w zakres pracy wchodzi opracowanie algorytmu do optymalizacji pracy elektrociepłowni. Zgodnie z podanym przez Autora tłumaczeniem teza pracy została sformułowana następująco: „stworzenie przedstawionego algorytmu obliczeniowego, jest odpowiedzią na

zapotrzebowanie jednostek produkcyjnych o złożonej strukturze wytwórczej dla tego typu analiz. *Zastosowanie algorytmu pozwala na bieżąco śledzić koszty i przychody z produkcji energii elektrycznej i ciepła. Jest narzędziem wspierającym podejmowanie decyzji dla najbardziej opłacalnej konfiguracji pracy elektrociepłowni hybrydowej.*”

Autor zaprezentował w rozprawie niezwykle bogato udokumentowaną analizę wpływu poszczególnych parametrów i czynników na pracę poszczególnych układów jak i na chwilowe zyski lub straty ekonomiczne. Niezwykle cenne jest zweryfikowanie modelu numerycznego w oparciu o pomiary eksperymentalne. Ze względu na skalę i złożoność rozpatrywanych układów walidacja choć niezwykle istotna i pożądana, nadal stanowi rzadkość w tego typu badaniach i analizach.

Opiniowana praca zawiera:

- a) wstęp,
- b) bogaty i wieloźródłowy opis stosowanych metodologii, typów analiz, sposobów modelowania matematycznego,
- c) zwięźle sformułowany cel, zakres rozprawy oraz tezy pracy,
- d) szczegółowy opis instalacji,
- e) model matematyczny elektrociepłowni hybrydowej, bazującej na kotłach parowych, kotłach wodnych i silnikach gazowych,
- f) szczegółową analizę układów poprzedzoną założeniami i uproszczeniami,
- g) wielowariantowe wyniki obliczeń dla głównych analizowanych układów i 5 różnych scenariuszy,
- h) porównanie wyników obliczeń,
- i) weryfikację modelu matematycznego,
- j) dyskusję wyników i zwięźłe podsumowanie, w postaci najistotniejszych wniosków.

Przyjęta przez Autora koncepcja, jak i metodyka rozwiązania przedstawionego w rozprawie problemu, zostały poprawnie dobrane i pomimo dokonanych uproszczeń, pozostają poprawne pod względem merytorycznym. Autor, swoją pracą udokumentował dobre opanowanie warsztatu naukowego. Na podkreślenie zasługuje wiedza i umiejętności z zakresu modelowania energetycznego i ekonomicznego układów energetycznych oraz opanowanie narzędzi, w tym implementacja i opracowanie kodu numerycznego dla przeprowadzania symulacji komputerowych, jak i jego weryfikacja. W rozprawie, z sukcesem wykorzystano opracowany i przetestowany w rzeczywistych warunkach kod numeryczny. Opracowany program komputerowy może stanowić niezwykle istotne narzędzie wspomagające procesy decyzyjne w prawidłowo opomiarowanych i monitorowanych jednostkach wytwórczych.

Do ważniejszych elementów pracy stanowiących oryginalny wkład Autora należy zaliczyć:

1. Opracowanie matematycznego modelu ekonomiczno-energetycznego hybrydowej elektrociepłowni.
2. Wdrożenie i przetestowanie opracowanego modelu w rzeczywistej elektrociepłowni.

3. Wykonanie badań dla różnych niezależnych jednostek wytwórczych.
4. Przedstawienie zmian parametrów ekonomicznych dla poszczególnych wariantów analizowanych systemów w czasie.
5. Porównanie poszczególnych wariantów układów dla różnych obciążeń cieplnych systemów.
6. Analizę wpływu wahań parametrów wejściowych na wyniki końcowe.

III. Uwagi rzeczowe i pytania do Autora

Rozprawa jest napisana przejrzysto, jednak niektóre kwestie wyszczególnione poniżej wymagają dodatkowego wyjaśnienia:

1. W rozdziale trzecim podano cel, zakres i tezy pracy. Jednak nie wszystkie one wydają się być poprawnie sformułowane i wspierać choćby z tytuł rozprawy. Jak podaje Autor rozprawy, jej celem jest opracowanie algorytmu matematycznego dla optymalizacji elektrociepłowni. Czy faktycznie taki był cel i tylko on był zrealizowany? Wówczas rozprawę należało by ograniczyć do jednego rozdziału model matematyczny i ew. kolejnego prezentującego poprawność działania algorytmu i przykładowe wyniki.
2. Jaka jest dokładna teza pracy którą Autor w swojej rozprawie udowadnia?
3. Przez pracę często przewija się wyrażenie „optymalizacja” oraz poszukiwanie (cytuje) „najbardziej ekonomicznie optymalnej” lub „najbardziej opłacalnej” konfiguracji pracy elektrociepłowni. Pomijając poprawność tych wyrażeń, należy stwierdzić, że model nie zawiera żadnej funkcji celu, ani kryterium optymalizacyjnego - nie zawiera tym samym narzędzi dla optymalizacji. Czym dla Autora jest optymalizacja, jaką metodologię zastosowano i jakie było kryterium optymalizacyjne? Prosiłbym o wyjaśnienie w tej kwestii.
4. W wielu miejscach na wykresach i w tabelach prezentowany jest bardzo ważny parametr „cumulated GHP profitability” lub sam „profitability”. W rozprawie nie podano jednak jak parametry te wyznaczano. Zastanawia również co dokładnie dla Autora oznacza wartość skumulowana?
5. Na stronie 17 podano „all above listed assumptions are considered” jednak trudno doszukiwać się tam listy założeń. Jakie były faktyczne założenia do obliczeń i gdzie się one znajdują? Np. jaki jest poziom emisji CO₂/GJ i jak został on wyznaczony dla obliczeń realizowanych w rozdziale 6.
6. W jednym z wniosków Autor stwierdza, że „Elektrownia hybrydowa wyposażona w jednostki napędzane gazem ziemnym i odnawialne źródła energii, znacznie zmniejsza zależność od emisji CO₂ i zmiany cen nośników energii”. W rozprawie w szczególności w części poświęconej analizie układów nie ma ani słowa o odnawialnych źródłach energii, na jakiej podstawie wysnuto więc taki wniosek?
7. Jakie byłyby potencjalne propozycje rozszerzeń i wskazówki dla kontynuatorów badań o podobnej tematyce?

IV. Strona redakcyjna pracy

Rozprawa doktorska jest zredagowana w większości poprawnie. Zawiera jednak szereg błędów literowych i niepoprawnych konstrukcji gramatycznych. Zdarzają się zdania urwane lub niejasne stwierdzenia. Opis i wyprowadzenie równań oraz przygotowanie rysunków wysokiej jakości, o dobrze przemyślanej zawartości, jak i ilości, nie budzi w większości przypadków zastrzeżeń. Poniżej zestawiono ważniejsze zauważone w pracy usterki redakcyjne, które jednak nie wpływają znacząco na czytelność tekstu ani na jego ocenę:

- a) brak jest odnośników literaturowych do szeregu podawanych w pracy wzorów np. (3) , (6-7), w wielu przypadkach strumienie masowe mają w oznaczeniach poprzesuwane kropki,
- b) w wykazie oznaczeń pominięto szereg istotnych wielkości, np. T_{max} , P_{max} , T_N , czy sprawności,
- c) w wielu miejscach w tekście, w tabelach (8.1) oraz na rysunkach (7.10) jako separator dziesiętny stosowane są naprzemiennie kropki i przecinki co nie jest poprawne, w konsekwencji nie wiadomo co oznacza zapis 28,222MWh,
- d) brak jest oznaczeń lub jednostek na osi X oraz osi Y (np. rys 7.15), każdy rysunek powinien mieć czytelny opis osi i jednostki,
- e) opis rysunku 7.2 występuje dwukrotnie, na stronie 44 i stronie 45,
- f) niemal wszystkie rysunki są wysokiej jakości, dziwi fakt że rys. 6.12 i 6.13 mają znacznie słabszą jakość,
- g) na stronie 15 znajdują się następujące po sobie i wzajemnie wykluczające się stwierdzenia: "The emission is increased from 3.1 tonnes to 18.7 tones. The emission increased from 3625 tonnes to 7238 tonnes",
- h) w pracy znajdują się drobne literówki jak i urwane zdania np. " Moreover (s.17), „form” zamiast „from” w wielu miejscach (s.51, s.54, s.62), „subsidy is a ind of incentive for...” (s.43) , „during at low”,
- i) brak konsekwencji w formatowaniu literatury (np. porównaj [27, 45] i [1]) .

V. Wniosek końcowy

Przedstawiona praca stanowi pewną zamkniętą dobrze opracowaną całość, dowodzi posiadania przez Autora zasobu wiedzy z zakresu modelowania układów cieplnych stosowanych w elektrociepłowniach i to zarówno pod względem energetycznym jak i ekonomicznym oraz opanowania w stopniu dobrym zagadnień obliczeniowych, metod analizy zjawisk, jak i umiejętności analizowania uzyskanych wyników, ich interpretacji i falsyfikacji oraz wyciągania logicznych wniosków. Autor w swojej rozprawie w sposób właściwy zaprezentował istotę przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników.

Recenzowana rozprawa doktorska wskazuje na znaczny wkład pracy Autora i dowodzi rozwiązania problemu naukowego. Wyniki z prowadzonych badań zostały opublikowane w bardzo dobrym czasopiśmie Energy Conversion and Management: Król, J., Ochoń, P. (2018). Economic analysis of heat production in existing medium size combined heat and power plant, with respect to the CO₂ allowances purchasing cost. Energy Conversion and Management, 171, 110-125; Król, J., Ochoń, P. (2018). Economic analysis of heat and electricity production in combined heat and power plant equipped with steam and water boilers and natural gas engines. Energy Conversion and Management, 176, 11-29; oraz Król, J., Ochoń, P. (2019). Sensitivity analysis of hybrid combined heat and power plant on fuel and CO₂ emission allowances price change. Energy Conversion and Management, 196, 127-148.

Przedstawiona rozprawa pozwala stwierdzić, że Autor stał się specjalistą w zakresie energetycznego i ekonomicznego modelowania układów ciepłych.

Podsumowując niniejszą recenzję stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Jarosława Króla spełnia oczekiwania stawiane zwyczajowo rozprawom doktorskim, a także wymagania formalne stawiane pracom doktorskim i odpowiada warunkom określonym w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i może stanowić podstawę do ubiegania się przez mgr inż. Jarosława Króla o stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.



Marek Jaszczur