

dr hab. inż. Monika Lewandowska  
Instytut Fizyki  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Szczecin, dn. 29.05.2014

**Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Rachtana zatytułowanej:**  
**„Analiza energetyczna i ekonomiczna turbogazowej mikrośiłowni  
kogeneracyjnej z akumulacją energii – pracującej ze zmiennym  
obciążeniem w systemie wyspowym”**

Recenzowana rozprawa powstała pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Leszka Malinowskiego, na Wydziale Techniki Morskiej i Transportu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

Praca doktorska mgr inż. Wojciecha Rachtana poświęcona jest opracowaniu autorskiego modelu matematycznego turbogazowej mikrośiłowni kogeneracyjnej z akumulacją ciepła i energii elektrycznej, pracującej ze zmiennym obciążeniem w systemie wyspowym. Prezentowany w pracy kompleksowy model uwzględnia m.in.

- zmiany w czasie zapotrzebowania zasilanych odbiorców na energię elektryczną i na ciepło użytkowe,
- związek chwilowej sprawności agregatu prądotwórczego i chwilowej wydajności cieplnej układu z zewnętrznym obciążeniem elektrycznym,
- kontrolę i przewidywanie stanu akumulatorów energii elektrycznej i ciepła w okresie cyklu pracy siłowni,
- okresy niewielkiego obciążenia elektrycznego (np. nocnego), w których praca agregatu prądotwórczego może być nieopłacalna,
- koszty paliwa oraz serwisu i wymian zużytych urządzeń,
- zarządzanie żywotnością urządzeń.

Opracowany model umożliwia ocenę badanego układu pod względem: wydajności i efektywności energetycznej, ekonomicznej oraz ekologicznej. Analizuje też zużycie energii pierwotnej podczas pracy układu oraz jego wpływ na środowisko naturalne. Model pozwala również na określenie niezbędnej pojemności akumulatorów ciepła i energii elektrycznej w danych warunkach pracy oraz wybranie optymalnej strategii pracy układu. Są to informacje bardzo istotne z punktu widzenia zarówno inwestora, projektanta układu, jak również jego użytkownika.

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej jest bardzo aktualna oraz interesująca zarówno pod względem poznawczym, jak również ze względu na duże znaczenie praktyczne. Z przedstawionego przeglądu literatury wynika, że tematyka związana z energetyką rozproszoną, w tym również układami kogeneracyjnymi, cieszy się obecnie na świecie bardzo dużym zainteresowaniem. W literaturze można znaleźć prace zbliżone tematycznie do omawianej rozprawy doktorskiej, m.in. poświęcone poszukiwaniu najlepszych strategii pracy

układów kogeneracyjnych. Trzeba jednak zauważyć, że w literaturze nie zaprezentowano dotąd modelu uwzględniającego tak wiele aspektów rozważanego zagadnienia.

### **Krótki opis pracy i jej struktura**

Temat rozprawy jest jasno sformułowany i prawidłowo wskazuje jej zawartość. Bezpośrednim celem przeprowadzonych badań było: (i) stworzenie modelu matematycznego umożliwiającego wyznaczenie zużycia paliwa mikrośilowni kogeneracyjnej pracującej w warunkach zmiennego obciążenia w systemie wyspowym, (ii) określenie wpływu strategii pracy układu na zużycie paliwa oraz na efekt ekonomiczny, a także (iii) określenie optymalnych strategii umożliwiających uzyskanie najmniejszego zużycia paliwa lub najlepszego efektu ekonomicznego.

Tekst recenzowanej rozprawy liczy 170 stron, zawiera wprowadzenie, cztery rozdziały merytoryczne oraz podsumowanie i wnioski. Tekst rozprawy ilustrowany jest rysunkami, schematami, wykresami oraz tabelami, których spis zamieszczono na końcu pracy. Na końcu każdego z rozdziałów (oraz każdej części rozdziału 4) umieszczono odnoszącą się do niego bibliografię. W rozdziałach 4.1-4.4 Autor zamieścił też przydatne dla czytelnika wykazy oznaczeń. Tekst rozprawy zakończony jest spisem tabel i rysunków. Rozprawa poprzedzona jest streszczeniami oraz listami słów kluczowych w języku polskim i angielskim. Rozprawę uzupełnia drugi obszerny tom (439 stron) z załącznikami zawierającymi m.in. wydruki arkuszy obliczeniowych programu MathCad.

W rozdziale pierwszym „**Wprowadzenie**” omówiono, w sposób zwięzły i przystępny, podstawowe zagadnienia i pojęcia dotyczące tematyki pracy, takie jak: mikrokogeneracja, układy wyspowe, mikroturbiny oraz podstawowe problemy związane z ich eksploatacją. Przedstawiono również przegląd literatury uzasadniający podjęcie proponowanego zakresu badań. W rozdziale drugim „**Koncepcja rozprawy doktorskiej**” zdefiniowano układ kogeneracyjny będący przedmiotem badań oraz sformułowano tezę i cel pracy.

Rozdział trzeci „**Metoda – Symulacje pracy układu kogeneracyjnego**” Autor poświęcił ogólnemu opisowi struktury i właściwości stworzonego modelu. Opis ten został znacznie rozbudowany w kolejnym rozdziale. Przedstawiono również (rozd. 3.8.2) rzeczywisty układ kogeneracyjny z mikroturbiną Capstone C30 HPNG, zainstalowany w Ośrodku Szkoleniowo-Badawczym w Zakresie Energii Odnawialnej w Ostoi. Autor korzystał z tego układu w celu przeprowadzenia pomiarów charakterystyk częściowego obciążenia mikroturbiny, które następnie zostały użyte w modelu matematycznym.

Kolejne części obszernego rozdziału czwartego „**Szczegółowy opis modelu obliczeniowego**” zawierają opis modeli obliczeniowych poszczególnych podsystemów analizowanego układu. W podrozdziale 4.1 omówiono autorski model mikroturbiny wraz z układem przetwarzania napięcia. Część 4.2 poświęcono opisowi modelu akumulatorów energii elektrycznej (*Kinetic Battery Model - KiBaM*) zaczerpniętego z literatury. W części 4.3 przedstawiono autorski model ciepłowniczej części układu kogeneracyjnego obejmującej odzyskowy wymiennik ciepła spaliny-woda grzewcza, zasobniki ciepłej wody oraz instalację wody technologicznej. Obliczenia dla krzyżowo-prądowego wymiennika odzyskowego wykonywane są klasyczną metodą  $\epsilon$  - NTU. W części 4.4 Autor omówił zastosowane

wskaźniki oceny efektywności działania układu (sprawność elektryczna, sprawność całkowita, racjonalna sprawność egzergetyczna), wskaźniki wyniku ekonomicznego (*Net Present Value - NPV*) oraz wskaźnik oceny wpływu na środowisko (*Primary Energy Saving - PES*).

W rozdziale piątym „**Wyniki przykładowych symulacji**” Autor przedstawił wyniki przykładowych obliczeń z wykorzystaniem opracowanego modelu dla sześciu różnych strategii pracy analizowanego układu. W przykładowych obliczeniach wykorzystano dobowe charakterystyki zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepło zaczerpnięte z literatury. Przyjęte zapotrzebowanie na ciepło jest zapotrzebowaniem reprezentatywnego dnia z przełomu marca i kwietnia. Rozdział szósty rozprawy zawiera podsumowanie pracy oraz wnioski.

### **Ocena merytorycznej strony pracy**

Zasadniczą część pracy doktorskiej stanowi opracowanie autorskiego modelu obliczeniowego siłowni kogeneracyjnej. Prezentowany model został stworzony, a następnie opisany w rozprawie, z dużą starannością i skrupulatnością. Podczas lektury pracy rzuca się w oczy dbałość Autora o to, aby model odwzorowywał układ rzeczywisty z jak najlepszą dokładnością, zauważyłam jednak, że w modelu nie uwzględniono zużycia energii przez pompy w instalacji wody technologicznej. Dobór zastosowanych modeli matematycznych oraz metod numerycznych nie budzi zastrzeżeń. Poprawność obliczeń poszczególnych bloków programu jest weryfikowana poprzez sprawdzanie wartości szeregu wielkości kontrolnych i walidacyjnych. Dobór rozpatrywanych strategii pracy jest dobrze uzasadniony. Należy jeszcze raz podkreślić, że w literaturze nie przedstawiono dotąd równie kompleksowego modelu siłowni kogeneracyjnej.

Pewien niedosyt pozostawia lektura rozdziału piątego prezentującego wyniki przykładowych symulacji. Autor przedstawia ocenę ekonomiczną analizowanego układu dla okresu rocznego i 20-letniego. Tymczasem bazuje ona na wynikach symulacji przeprowadzonych wyłącznie dla założonej charakterystyki zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepło typowej dla dnia z przełomu marca i kwietnia. W rozdziale 5.1. Autor stwierdza: „*Wszelkie próby symulacji układu dla zapotrzebowania z miesięcy od stycznia do marca wykazały, że bez dodatkowego źródła ciepła w układzie kogeneracyjnym nie ma możliwości pokrycia całkowitego zapotrzebowania na ciepło*”. Tymczasem byłoby bardzo interesujące przyjęcie założenia, że w ogrzewanym obiekcie znajdują się dodatkowe grzejniki elektryczne, lub też grzałki elektryczne wody w zasobnikach ciepła, a następnie odpowiednie zwiększenie dobowego zapotrzebowania na moc elektryczną. Mielibyśmy przy tym do czynienia z efektem synergicznym – zwiększenie zapotrzebowania na moc elektryczną spowodowałoby zarazem zwiększenie produkcji spalin i odzyskiwanego z nich ciepła. Przyjęcie takiego założenia pozwoliłoby na sprawdzenie czy rzeczywiście badany układ nie jest w stanie pokryć całkowicie zapotrzebowania na ciepło również w okresie zimowym. Uważam, że dopiero po potwierdzeniu, że odbiorcy mają zapewnione w ciągu całego roku pokrycie zapotrzebowania zarówno na energię elektryczną jak i na ciepło, można byłoby dokonać bardziej miarodajnej oceny długofalowego wyniku ekonomicznego dla analizowanego układu. Jednak uwzględnienie dodatkowych grzałek lub grzejników wiązałoby

się ze znaczną komplikacją regulacji pracy układu (dodatkowy stopień swobody). Proponowana modyfikacja modelu mogłaby być więc stać się dobrym punktem wyjścia dla dalszej pracy naukowej Autora.

W recenzowanej rozprawie zauważyłam również kilka drobnych niedociągnięć, a mianowicie:

- w rozdziale 4.3.2.4 Autor podaje przedziały liczb Reynoldsa i Prandtla, dla których mają zastosowanie wykorzystywane w modelu korelacje na liczbę Nusselta czy Colburna, jednak nie precyzuje jaki zakres liczb Reynoldsa i Prandtla występuje w prowadzonych przez niego symulacjach,
- w rozdziale 4.3.4.2 przy omawianiu występujących w modelu właściwości fizycznych czynników Autor pominął współczynnik lepkości kinetycznej wody oraz gęstość, przewodność cieplną i współczynnik rozszerzalności objętościowej powietrza.

Nieco zastrzeżeń może również budzić sposób upowszechniania wyników badań prowadzonych przez Autora. Autor jest współautorem pracy opublikowanej w prestiżowym czasopiśmie zagranicznym (*Energy*, IF<sub>2013</sub> = 4.159). Przedstawione w niej wyniki zostały wykorzystane w pracy doktorskiej, jednak w rozprawie można znaleźć tylko dwie bardzo lakoniczne wzmianki na ten temat (praca została zacytowana w rozdziałach 3 i 4.3 jako [3-12] i [4.3-16]). Autor jest również współautorem trzech innych artykułów o tematyce ściśle związanej z tematem pracy doktorskiej opublikowanych w czasopismach krajowych (wymienionych w części B wykazu czasopism punktowanych MNiSW), a mianowicie:

1. L. Malinowski, W. Rachtan, B. Batko, J. B. Dawidowski, P. Rogalska: Układ kogeneracyjny oparty na mikroturbinie Capstone C30, *Inżynieria Rolnicza* 13 (2009) 357-360,
2. A. Zmuda, W. Rachtan: Systemy kogeneracyjne oparte na mikroturbinach, *Elektro Info* nr 7-8 (2012) 62-67,
3. W. Rachtan, A. Zmuda: Charakterystyka technologii mikroturbin pracujących w kogeneracji, *Elektro Info* nr 9 (2012) 110-115,

które, z niezrozumiałych powodów, nie zostały nawet wspomniane w rozprawie doktorskiej. Tymczasem prace te mogły być przynajmniej zacytowane w rozdziale 3.8.2. Na podstawie materiału już zebranego w przedstawionej rozprawie doktorskiej, lub po przeprowadzeniu i analizie wyników dodatkowych symulacji, mogłoby powstać kilka kolejnych publikacji w renomowanych czasopismach zagranicznych i wydaje się dziwne dlaczego Autor jeszcze nie podjął się tego zadania.

### **Ocena pracy od strony formalnej**

Rozprawa napisana jest w sposób poprawny i zrozumiały, aczkolwiek tekst jest nieco ciężki w odbiorze. Opis modelu obliczeniowego wdaje się nazbyt drobiazgowy, co utrudnia śledzenie głównego nurtu tekstu. Część szczegółów, w tym przede wszystkim opis obsługi programu *KiBaM Battery Parameter Finder* opracowanego i udostępnionego w internecie przez innych autorów, powinna być raczej zostać umieszczona w załącznikach.

Tekst pracy przygotowany został bardzo starannie pod względem redakcyjnym. Mimo to jednak Autor nie ustrzegł się drobnych pomyłek lub uchybień, np. „liczba Colburne’a” zamiast „liczba Colburna” (str. 21 i 97), błąd na rysunku 3-4a - dobowy symulacja kończy się

na godz. 23 zamiast na 24, zbyt niska rozdzielczość rysunku 4.3-1, utrudniająca odczytanie niektórych indeksów, w tabeli 4.3-3 (wiersz: Odpowiednia zależność  $\varepsilon$  - NTU) błędnie odwołano się do wzorów (4.3-27) i (4.3-28) zamiast do (4.3-28) i (4.3-29).

### **Wnioski końcowe**

Wymienione uwagi krytyczne nie wpływają istotnie na ogólną wysoką ocenę przedstawionej rozprawy doktorskiej. Praca stanowi oryginalne osiągnięcie Autora w dziedzinie modelowania matematycznego siłowni kogeneracyjnych. Mgr inż. Wojciech Rachtan opracował i oprogramował szereg autorskich procedur, pozwalających na osiągnięcie celów pracy zdefiniowanych na początku rozprawy. Wykazał się przy tym biegłością w korzystaniu z literatury naukowej oraz bardzo dobrą znajomością zarówno teorii wymiany ciepła i metod numerycznych, jak również aspektów technicznych dotyczących analizowanego układu.

Podsumowując, stwierdzam, że praca mgr inż. Wojciecha Rachtana pod tytułem **„Analiza energetyczna i ekonomiczna turbogazowej mikrośilowni kogeneracyjnej z akumulacją energii – pracującej ze zmiennym obciążeniem w systemie wyspowym”** spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w świetle aktualnie obowiązujących przepisów (*Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. z 2003 r. Nr 65, poz. 595) z późniejszymi zmianami (Dz. U. z 2005 r. Nr 164, poz. 1365, Dz. U. z 2010 r. Nr 96, poz. 620, Dz. U. Nr 182, poz. 1228, Dz. U. z 2011 r. Nr 84, poz. 455, Dz. U. z 2014 r. poz. 1198) oraz *Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 3 października 2014 r. w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzania czynności w przewodach doktorskim i habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora* (Dz. U. z 14.10.2014 poz. 1383)). Dlatego też wnioskuję o dopuszczenie Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego i publicznej obrony pracy doktorskiej.

*Monika Lewandowska*