

Prof. dr hab. inż. Ryszard Bartnik
Politechnika Opolska
Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki
Katedra Inżynierii Bezpieczeństwa i Systemów Technicznych
ul. gen. K. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole

Julianów, 16 sierpnia 2022 r.

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Sylwii Kruk-Gotzman

**pt. „Techno-economic evaluation of combined cycle gas turbine (CCGT) and
adiabatic compressed air energy storage (ACAES) integration concept”**

1. Formalna podstawa recenzji

Podstawą sporządzenia niniejszej recenzji jest uchwała Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk z dnia 14 czerwca 2022 r. oraz pismo Dyrektora Instytutu dra hab. Marcina Lackowskiego profesora IMP PAN z dnia 5 lipca 2022 r. Promotorem głównym rozprawy jest prof. dr hab. inż. Janusz Badur, promotorem pomocniczym dr inż. Paweł Ziółkowski.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana praca doktorska napisana w języku angielskim zawiera 123 strony i została podzielona na 6 rozdziałów. Początek rozprawy zawiera Streszczenie w języku angielskim i polskim oraz Spis treści. Rozdział 1. obejmuje wprowadzenie do tematyki rozprawy oraz zakres pracy. Rozdział 2. obejmuje przegląd aktualnego stanu rynku energii elektrycznej w Polsce. Merytoryczna część dysertacji zawiera się w rozdziałach 3. i 4. Rozdział 5. zawiera dyskusję otrzymanych przez Doktorantkę wyników obliczeń. Rozdział 6. zawiera wynikające z pracy wnioski końcowe. Zamieszczony po nim wykaz literatury obejmuje 112 pozycji. Na końcu pracy zamieszczono ponadto dwa Dodatki z wybranymi fragmentami kodów obliczeniowych – ekonomicznych i termodynamicznych.

3. Ocena tematyki badawczej – aktualność problemu i zasadność podjęcia tematu

Doktorantka w swojej rozprawie by uelastyczyć pracę bloków zajęła się zatem, i słusznie, problemem magazynowania elektryczności za pomocą sprężonego powietrza. Stosowanym od dawna sposobem jej magazynowania jest magazynowanie za pomocą energii potencjalnej wody w górnych zbiornikach szczytowo-pompowych elektrowni wodnych. Brak odpowiednich hydrogeologicznych warunków w Polsce mocno jednak ten sposób ogranicza. Obecnie konieczność magazynowania, i to także w szczycie potrzeb, wynika z niestabilnej pracy elektrowni na paliwa kopalne wymuszanej przez OZE. Źródła te mają bowiem

pierwszeństwo w dostępie do sieci elektroenergetycznej dostarczającej elektryczność odbiorcom, co powoduje, że elektrownie muszą dostosowywać się do ich bardzo „chimerycznej” i kilkugodzinowej pracy. Wskutek tego elektrownie setki razy w roku są wyłączane z ruchu lub gwałtownie redukują swoją moc, co bardzo niekorzystnie wpływa na ich żywotność techniczną. Szybko ulegają degradacji, co wymusza ich częste i kosztowne remonty. Aby się tego ustrzec konieczne jest zapewnienie im stabilnej pracy magazynując produkowaną w nich energię elektryczną na przykład właśnie za pomocą sprężonego powietrza w zbiornikach. Innymi możliwościami magazynowania elektryczności, to magazynowanie za pomocą pola magnetycznego, ciekłego powietrza, akumulatorów kwasowo-ołowiowych, niklowo-kadmowych, litowo-jonowych. Zdolności magazynowe tych sposobów są jednak znikome i nie mają zatem praktycznego znaczenia. W tym świetle wyraźnie widać, że wykorzystanie magazynowania elektryczności za pomocą sprężonego powietrza w porównaniu z jej magazynowaniem za pomocą wodoru jest racjonalnym termodynamicznie i ekonomicznie sposobem. W niniejszej pracy zatem ten sposób magazynowania Doktorantka poddała analizie.

Podsumowując ocenę tematyki badawczej rozprawy doktorskiej mgr inż. Sylwii Kruk-Gotzman pt. „Techno-economic evaluation of combined cycle gas turbine (CCGT) and adiabatic compressed air energy storage (ACAES) integration concept” należy stwierdzić, że jest ona odpowiedzią na potrzebę uelastycznienia pracy elektrowni i elektrociepłowni ciepłych wynikającą z konieczności dostosowania ich mocy do współpracy z mocą wytwórczą OZE, których moc ma priorytet w dostępie do KSE.

Praca ma charakter teoretyczno-obliczeniowy. Dotyczy zagadnień termodynamicznych i ekonomicznych związanych z akumulacją energii elektrycznej wytwarzanej w bloku gazowo-parowym pracującym z pseudokondensacją na potrzeby ciepła grzejnego – rys. 3.1, 3.7. Akumulacja odbywa się za pomocą sprężonego powietrza w zbiorniku, który następnie, ogólnie mówiąc, służy jako źródło do produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem turboekspanderów.

Problem rozważany w rozprawie przez mgr inż. Sylwię Kruk-Gotzman jest zatem ważny z naukowego punktu widzenia i jednocześnie aktualny. Znaczenie pracy podjętej przez Doktorantkę jest ponadto dlatego istotne, gdyż podjęła się ilościowej oceny termodynamicznej i ekonomicznej wpływu współpracy bloku gazowo-parowego z magazynem sprężonego powietrza.

4. Sposób rozwiązania zagadnienia naukowego i jego ocena

Autorka rozprawy postawiła sobie zadanie rozwiązania zagadnienia naukowego polegającego na analizie termodynamicznej i ekonomicznej współpracy jednociesnieniowego bloku gazowo-parowego z magazynem sprężonego powietrza. Zaproponowany przez siebie układ Doktorantka przedstawiła na rysunku 3.1. Ponadto na rysunkach 3.2, 3.3, 3.4 i 3.5 zaprezentowała 4 sposoby jego pracy.

W celu przeprowadzenia termodynamicznych i ekonomicznych obliczeń Doktorantka zbudowała własne, co ważne, kody obliczeniowe w języku programowania Python. Tworzenie własnych kodów jest wartością samą w sobie, dowodzi dużej wiedzy i „sprawności” naukowej ich twórcy.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

5.1. Uwagi i usterki redakcyjne

- Doktorantka nie uniknęła w pracy literówek, jak na przykład „zjedzenie” litery t w słowie plant na przykład w Streszczeniu.
- W podpisie rysunku 3.1. został pominięty napędzany turboekspanderami wysoko- i niskociśnieniowym generator G3.
- Na rysunku 3.1 oraz na rysunkach 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 pokazujących cztery sposoby pracy analizowanego w pracy układu z rys. 3.1 nie zostały naniesione, a powinny, numeracje poszczególnych punktów układu, w których zostały wyznaczone parametry termiczne czynników termodynamicznych; numeracje te są tylko zaznaczone w tabelach 3.3, 3.4 i na trzech rysunkach: 3.6, 3.7, 3.8; naniesienie poszczególnych punktów układu na wszystkich rysunkach znacząco podniosłoby „przejrzystość” pracy i ułatwiłoby jej czytanie.
- W układzie redakcyjnym pracy dostrzeżono ponadto niedociągnięcie, które w zasadzie należałoby zakwalifikować do uwag merytorycznych. Doktorantka używa pojęcia „*thermal energy*”. Ciepło, tak jak i praca nie są postaciami energii, mimo tego, że ich ilość mierzy się tymi samymi jednostkami. Energia jest własnością materii, jest funkcją stanu ciała, gdy ciepło i praca nimi nie są. Ilość przekazanego ciepła zależy bowiem nie tylko od stanów początkowego i końcowego ciała, lecz także od sposobu przejścia między tymi stanami. Ciepło jest sposobem przekazywania energii między ciałami w wyniku różnicy ich temperatur. Ciepło, tak jak i praca przestają istnieć w momencie zakończenia wykonania pracy lub przepływu ciepła. Zostaje tylko skutek tych zjawisk, tj. zostaje zmieniona wartość energii ciał w nich uczestniczących. Ciepło, tak jak i praca nie są zatem funkcjami stanu. Nie można więc mówić o ilości ciepła zawartego w ciele. Można domniemywać, że Autorka pisząc o energii cieplnej (termicznej), myli pojęcie ciepła z energią wewnętrzną ciała, która jest funkcją stanu. Jej przyrost bowiem, wywołany przejściem od stanu 1 do 2, nie zależy od sposobu tego przejścia.

5.2. Uwagi merytoryczne i zagadnienia do wyjaśnienia podczas publicznej obrony

Do uwag merytorycznych należy zakwalifikować:

- brak w pracy całościowego modelu matematycznego układu przedstawionego na rysunku 3.1, co uniemożliwia jego sprawdzenie; kilka linijek jego listingu zamieszczonych w Dodatku B nie jest w stanie go zastąpić; zamieszczenie modelu istotnie zwiększyłoby wartość dysertacji

- brakuje w rozprawie wyjaśnienia na jakiej podstawie Doktorantka przyjęła parametry termodynamiczne powietrza przy sprężaniu dwustopniowym w sprężarkach C I i C II, i dwustopniowym rozprężaniu w turboekspanderach wysoko- i niskociśnieniowym E HP i E LP; należało co najmniej zaznaczyć, w jaki sposób zostały one zoptymalizowane
- w pracy zdaniem recenzenta Doktorantka niepotrzebnie zamieściła zbyt obszerne rozdziały 1. i 2, które mają w dużej mierze charakter przeglądowy; zajmują one niemalże 50% objętości pracy
- brakuje w rozprawie „szerokiej” dyskusji i analizy wyników obliczeń; przedstawiona w pracy w rozdziałach 5. i 6. ich analiza i dyskusja jest w moim przekonaniu daleko niewystarczająca; odczuwam duży niedosyt po ich przeczytaniu; znaczne ich poszerzenie byłoby z dużą korzyścią dla pracy
- w rozdziale 6. warto było, czy nawet wręcz należało, odnieść się do istotnych problemów integralnie związanych z tematyką rozprawy, tj. z koniecznością dostosowania pracy bloków energetycznych do niestabilnej i nieprzewidywalnej czasowo pracy źródeł OZE; problematyka ta była przecież główną motywacją podjęcia się przez Doktorantkę napisania rozprawy; warto zatem by podczas publicznej obrony pracy Doktorantka omówiła, choćby tylko w kilku zdaniach, zapisane poniżej trzy kluczowe problemy:
 - a) czy dostosowanie pracy bloków energetycznych do mających pierwszeństwo w dostępie do sieci elektroenergetycznej charakteryzujących się dużą losowością i krótkimi rocznymi czasami pracy źródeł OZE ma uzasadnienie techniczne, ekonomiczne i ekologiczne?; koszt ekologiczny związany z rozbudową infrastruktury bloków energetycznych, by mogły współpracować z OZE, chociaż trudny do oszacowania, także należałoby uwzględniać w analizach ekonomicznych; koszt ten istotnie pogorszyłby wyniki analiz
 - b) czy najkorzystniejszym technicznym, ekonomicznym i, co ważne, ekologicznym rozwiązaniem nie byłoby zrezygnowanie z subwencjonowanych przez Skarb Państwa OZE i budowanie, i rozwijanie energetyki jądrowej, która gwarantuje stabilność dostaw elektryczności przez cały rok, i w której jednostkowe koszty jej produkcji są nieporównanie niższe?
 - c) w jak dużym stopniu konieczność przystosowania bloków energetycznych, nie tylko gazowo-parowych, do współpracy z OZE winduje koszty produkcji w nich energii elektrycznej?
- w rozprawie brakuje „szerokiej” analizy poszczególnych 4 sposobów pracy układu przedstawionych na rysunkach 3.2, 3.3, 3.4, 3.5; na przykład analizę samodzielnej pracy turbiny gazowej (tj. w tzw. układzie prostym) na potrzeby podgrzewania powietrza doprowadzanego ze zbiornika sprężonego powietrza do turboekspanderów – rys. 3.5 –

należałoby przeprowadzić uwzględniając całkowite nakłady inwestycyjne na układ i roczny czas pracy tego sposobu pracy; cenna byłaby bowiem odpowiedź na pytanie, czy taki sposób pracy układu ma sens ekonomiczny; sposób ten, tak jak każdy z 3 pozostałych, rzutuje przecież na całkowitą efektywność energetyczną i ekonomiczną całego układu

- w pracy brakuje również w moim odczuciu analizy jednostkowego (na jednostkę energii) kosztu produkcji elektryczności dla całościowego układu z rysunku 3.1, a więc kosztu, w którym uwzględnione byłyby całkowite nakłady inwestycyjne na układ wraz ze wszystkimi sposobami jego eksploatacji, oczywiście z odpowiadającymi im ich rocznymi czasami pracy; koszt ten należałoby porównać z jednostkowym kosztem wyłącznie samodzielnej pracy klasycznego bloku gazowo-parowego, tj. bloku bez zbiornika sprężonego powietrza i czterema „podukładami”; uzupełnienie w ten sposób przedstawionych w rozdziale 4. metodyki i otrzymanych za jej pomocą wyników analizy ekonomicznej spowodowałoby, że rozprawa byłaby w jeszcze większym stopniu wartościowa
- również istotne byłoby obliczenie i przedstawienie w rozprawie rocznej sprawności energetycznej układu z rys. 3.1 uwzględniającej sprawności pracy wszystkich sposobów jego eksploatacji; wagami byłyby roczne czasy pracy poszczególnych sposobów odniesione do całkowitego rocznego czasu eksploatacji układu

Podsumowując, przedstawione powyżej uwagi krytyczne nie obniżają wartości naukowej rozprawy. Rolą bowiem recenzenta jest nie tylko zauważenie wartościowych jej stron, ale również i tych słabszych, i dyskusyjnych. Uwagi recenzenta wskazują jedynie kierunki dalszych możliwych (koniecznych) analiz współpracy bloków energetycznych, nie tylko gazowo-parowych, z magazynami sprężonego powietrza.

6. Wniosek końcowy recenzji

Rozprawa doktorska mgr inż. Sylwii Kruk-Gotzman pt. „Techno-economic evaluation of combined cycle gas turbine (CCGT) and adiabatic compressed air energy storage (ACAES) integration concept” obejmuje zagadnienia termodynamicznej i ekonomicznej ilościowej oceny współpracy bloku gazowo-parowego z magazynem sprężonego powietrza. Na podstawie przedstawionych wyników obliczeń można stwierdzić, że cel rozprawy został osiągnięty. Co więcej, wyniki przeprowadzonych w pracy analiz mogą być pomocne przy podejmowaniu decyzji o budowie magazynów przy blokach gazowo-parowych i stanowić materiał źródłowy do dalszych analiz termodynamicznych i ekonomicznych. Pomimo przedstawionych w punkcie 5.2. uwag krytycznych stwierdzam, że recenzowana dysertacja spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez przepisy ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

