

Dr hab. inż. Łukasz Bartela, prof. PŚ  
Politechnika Śląska  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych  
Ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice  
lukasz.bartela@polsl.pl

Gliwice, 21.09.2022

### **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**

Podstawą wykonania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Instytutu Maszyn i Urządzeń Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk z dnia 14 czerwca 2022 r. Promotorem pracy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Janusz Badur, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Paweł Ziółkowski.

#### **1. Zasadność podjęcia tematu**

Obserwowanym w skali globalnej procesom dekarbonizacyjnym, mającym swoje źródło w politykach energetyczno-klimatycznych wielu państw świata, a w tym państw zrzeszonych w ramach Unii Europejskiej, towarzyszy stopniowe odchodzenie od scentralizowanego wytwarzania energii elektrycznej w oparciu o wykorzystanie systemów spalających paliwa węglowe oraz paliwa gazowe. Energia tych źródeł wypierana jest w bilansach systemów wytwórczych najczęściej przez energię pozyskiwaną w oparciu o niestabilne mocowo oraz trudno prognozowalne źródła wytwórcze o charakterze rozproszonym, bazujące na wykorzystaniu energii pierwotnej wiatru oraz słońca. Rezygnacja ze stabilnych źródeł energetyki scentralizowanej, co ważne podlegających centralnemu dysponowaniu przez operatora systemu przesyłowego (OSP), prowadzi do wzrostu ryzyka utraty ciągłości dostaw energii na rynku, co też może znajdować odzwierciedlenie w wysokich kosztach gospodarczych. Maksyma o treści „*najdroższą energią jest energia niedoprowadzona do odbiorcy końcowego*” stoi u podstaw dziś wzrastającego zainteresowania systemami magazynowania energii, już nie tylko identyfikowanego w kręgach naukowo-badawczych, ale również, a może nawet przede wszystkim, w przemyśle oraz w otoczeniu decydentów politycznych. Obecnie rozwijane są zarówno systemy magazynowania o niewielkim potencjale pojemnościowym, predysponowane często dla współpracy ze źródłami prosumenckimi (akumulatory litowo-jonowe, sodowo-siarkowe, niklowo-wodorkowe, kwasowo-ołowiowe, czy też np. koła zamachowe), jak również systemy wielkoskalowe, predysponowane dla efektywnego bilansowania energii, nawet w skali krajowego systemu elektroenergetycznego (elektrownie szczytowo-pompowe, systemy magazynowania energii

w sprężonych gazach, systemy magazynowania energii w wodorze i produktach jego syntezy). Z punktu widzenia podnoszenia bezpieczeństwa energetycznego kraju zasadne wydaje się podejmowanie działań w zakresie rozwijania oraz budowy systemów wielkoskalowego magazynowania energii, które podlegać mogą, podobnie jak ma to miejsce w przypadku wielkoskalowych źródeł wytwórczych, dyspozycji OSP. Choć spośród wszystkich technologii magazynowania energii obecnie największą pojemnością magazynową odznaczają się na świecie elektrownie szczytowo-pompowe, to ich dalszy przyrost potencjału może być istotnie ograniczony (szczególnie w Polsce) z uwagi na brak wymaganych warunków hydrogeologicznych. Choć obecnie rozpatrywane jest wznowienie krajowej inwestycji w Młotach, która była realizowana przede wszystkim w latach 70. ubiegłego wieku, to potencjał w zakresie dalszego zwiększenia pojemności magazynowej tego typu systemów wydaje się w Polsce wyczerpany. Niestety nawet tak duża pojemność magazynowa, tj. 3 GWh, jaka ma być efektem wspomnianej inwestycji, może okazać się kroplą w morzu potrzeb krajowej elektroenergetyki. Wynika to z planów uzyskania na drodze dynamicznych działań tzw. neutralności klimatycznej, która zgodnie z obowiązującą Polityką Energetyczną Polski ma być zapewniona głównie przez nowe inwestycje w farmy wiatrowe oraz elektrownie jądrowe. Do dzisiaj trudno znaleźć odpowiedź na pytanie, jaką hierarchią względem siebie w dostępie do sieci będą odznaczały się te dwie grupy źródeł wytwórczych. Niezależnie jednak od sytuacji, jaka w finale kształtowania się krajowego miksu źródeł energii nastąpi, potrzeba wdrażania systemów magazynowania energii wydaje się nieodzowna. Wynika to głównie z tego, iż obserwujemy szybkie tempo wyczerpywania się zdolności bilansowania KSE na drodze wykorzystania mechanizmów dzisiaj najtańszych, jakimi są odpowiednio mechanizm DSR oraz transgraniczny przesył energii. Jeśli nie będzie inwestycji w obszarze magazynowania energii to czas w jakim energia elektryczna w skali roku nie będzie w dyspozycji jej odbiorców będzie wzrastał, co też będzie zakłócało realizację procesów gospodarczych. Już w roku 2018 koszty ogólnogospodarcze wynikające z braku dyspozycyjności energii elektrycznej na rynku były szacowane dla Polski w zakresie wartości od 7500 PLN/MWh do 13500 PLN/MWh (Majchrzak, H., 2018). Póki co niskie ciągle znaczenie tych kosztów wynika z wysokiego stopnia dyspozycyjności energii, co jest gwarantowane przez wysoką dyspozycyjność oraz elastyczność węglowych oraz gazowych jednostek wytwórczych.

W związku z potrzebą poszukiwania w obszarze technologii magazynowania energii rozwiązań możliwych do wdrożenia, zarówno z punktu widzenia warunków geologicznych, jak również efektywności ekonomicznej, dostępności rynkowej elementów i trwałości, wybór problematyki związanej z systemami magazynowania energii w sprężonym powietrze (CAES) jako przedmiotu analiz, dokonany przez Doktorantkę, należy uznać jako właściwy. Ponadto, hybrydowy system integrujący blok gazowo-parowy oraz system magazynowania energii w sprężonym powietrze należy także uznać jako interesujący z poznawczego punktu



widzenia. Choć literatura przedmiotu jest bogata w treści dotyczące innowacji w obszarze systemów CAES, to hybrydyzacja na drodze powiązania systemu magazynowania z obiegiem silnika ciepłego, jakim jest siłownia gazowo-parowa, nie jest popularną koncepcją rozpatrywaną w literaturze przedmiotu.

## 2. Charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska składa się z 6 rozdziałów. Uzupełniają ją ponadto zamieszczone przed zasadniczą częścią pracy spis treści oraz streszczenia (w języku polskim oraz angielskim). Po części zasadniczej pracy zamieszczona jest bogata bibliografia, która odnosi się do 113 cytowanych w pracy pozycji literaturowych. Na końcu pracy Doktorantka zamieściła kody jakie są podstawą opracowanych modeli obliczeniowych.

Pierwszy rozdział rozprawy stanowi wprowadzenie, w którym Doktorantka przybliżyła motywację dla podjęcia się tematyki badawczej (punkt 1.1). Wskazuje tutaj głównie na problematykę dotyczącą elastyczności pracy bloków gazowo-parowych, a w szczególności możliwości doprowadzenia, na drodze integracji cieplnej bloku z systemem CAES, do redukcji liczby odstawień wymuszonych bloku, na skutek których dochodzi do ostudzenia elementów kotła odzyskowego oraz elementów turbiny parowej, co prowadzi do degradacji tego urządzenia i tej maszyny, jak również potrzeby prowadzenia kosztownych procedur rozruchowych, mających przywrócić systemowi nominalny potencjał wytwórczy. W punkcie 1.2 Doktorantka przedstawia główny cel pracy, jakim jest przeprowadzenie analiz techniczno-ekonomicznych dla integracji cieplnej bloku gazowo-parowego z systemem CAES. W punkcie zestawiono również sześć obszarów badawczych, jakie są rozwinięte w treści kolejnych rozdziałów pracy. Punkt 1.3 odnosi się do stanu wiedzy w obszarze tematyki doktoratu, jaki reprezentuje literatura przedmiotu. Niestety wiele pozycji literaturowych odnosi się do marginalnych zagadnień z punktu widzenia rozwijanej przez Doktorantkę tematyki. Brakuje za to nawiązania do tych pozycji literaturowych, które prezentują wyniki badań z zakresu hybrydyzacji z wykorzystaniem systemów magazynowania energii w sprężonych gazach. W punkcie 1.3 pojawiają się również błędne informacje, jak np. ta, że system w Huntorf nie jest wyposażony w rekuperacyjny wymiennik ciepła. W ostatnim punkcie rozdziału (1.4) przybliżono strukturę pracy, która według mojej opinii nie budzi zastrzeżeń. W treści tego punktu Doktorantka wskazuje na podstawową zaletę jaką daje przedmiotowa hybrydyzacja. Jest nią według Doktorantki, z czym należy się zgodzić, wyeliminowanie ze struktury systemu CAES zasobnika ciepła (TES), który jest elementem obligatoryjnym dla tzw. systemów adiabatycznych, i który stanowi element problematyczny w związku z identyfikowanymi wyzwaniem konstrukcyjnymi, jak również element decydujący o wielkości nakładów inwestycyjnych (przykładem może być tutaj wstrzymana inwestycja w system Adele w Niemczech). W tym miejscu należy negatywnie odnieść się do nomenklatury jaką Doktorantka stosuje w całej objętości pracy, a nawet już w samym tytule

pracy. W opinii recenzenta system CAES, jaki jest przedmiotem analiz w doktoracie, w rzeczywistości nie jest systemem adiabatycznym. Ten system jest diabatyyczny, bowiem do jego obiegu cieplnego trafia ciepło spoza osłony bilansowej tego systemu, tj. ciepło spalin opuszczających turbinę gazową bloku gazowo-parowego. Tym sposobem analizowany system (CCGT+CAES) jest systemem hybrydowym, integrującym podsystem stanowiący blok gazowo-parowy z podsystemem stanowiącym diabatyyczny system CAES.

W rozdziale 2. Doktorantka opisuje zasady jakie rządzą krajowym i europejskim rynkiem energii. Niepotrzebnie dużo miejsca poświęcono w pracy rynkowi handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych (ETS). System ten nie ma istotnego powiązania z problematyką kluczową dla zagadnień jakimi zajmowała się Doktorantka. Szkoda za to, że Doktorantka nie pokusiła się w rozdziale o dyskusję na temat potencjalnych mechanizmów rynkowych, które mogłyby pobudzić inwestycje w sektorze magazynowania energii. Takie systemy potencjalnego wsparcia są proponowane w literaturze przedmiotu. W rozdziale znajdują się błędy, jak się wydaje bardziej o charakterze redakcyjnym. Mowa tu o wartościach przybliżonych w pierwszym akapicie punktu 2.2.2. Oczywiście roczna konsumpcja energii w Polsce to 174.6 TWh, a nie jak to napisała Doktorantka 174.6 GWh. Również nie chodzi zapewne o moce na poziomach odpowiednio 23 MW i 26.5 MW, ale raczej o 23 GW i 26.5 GW. Rozdział 2. jest potrzebny, ale często przytaczane tutaj informacje mają w opinii recenzenta marginalne znaczenie.

W rozdziale 3. przedstawiono opisy modeli termodynamicznych dla poszczególnych obiegu cieplnych. Już na początku rozdziału Doktorantka wymienia uproszczenia jakie przy budowie modeli wykorzystała. Wiele z tych uproszczeń jest nieuprawnionych do użycia w ramach analiz, które Doktorantka przeprowadziła. Brak jest zrozumienia przykładowo dla pominięcia strat ciśnienia przy przepływie czynników przez elementy instalacji. Wystarczającym uproszczeniem byłoby nieuzmiennianie w toku obliczeń wielkości spadków z uwagi na zmianę parametrów przepływu (co powszechnie uzyskuje się na drodze zastosowania równania Darcy'ego-Weisbacha). Ta sama uwaga odnosi się do pominięcia przez Doktorantkę w obliczeniach strat mechanicznych, czy też elektrycznych występujących w turbozespołach. Niewłaściwe jest także przyjmowanie stałych wartości dla sprawności izentropowych maszyn, a głównie dla sprężarki systemu CAES, która przy współpracy z nieizobarycznym zbiornikiem na sprężone powietrze, siłą rzeczy, musi działać przez względnie długi okres z obciążeniem daleko odbiegającym od obciążenia nominalnego, co też oznacza zmianę zarówno stosunku ciśnień, jak i wartości właśnie sprawności izentropowej. Jak najbardziej na miejscu właściwe byłoby tutaj wykorzystanie referencyjnej charakterystyki sprężarki (w literaturze przedmiotu można znaleźć takie charakterystyki, które są łatwe do zaadaptowania we własnych algorytmach obliczeniowych). Dużym uproszczeniem jest także przyjęcie dosyć trywialnych założeń dla potrzeby określania efektów pracy ekspandera powietrznego. W rzeczywistych systemach CAES na wlocie powietrza do ekspandera



zabudowane są zawory dławiące przepływ, których zadaniem jest utrzymywanie w miarę stałego ciśnienia na wlocie do ekspandera, niezależnie od stopnia wypełnienia powietrzem zbiornika ciśnieniowego. Realizowany proces dławienia jest odpowiedzialny za znaczące straty energii, co też wpływa na obniżenie sprawności magazynowania. Ważnym punktem w rozdziale jest punkt 3.1, gdzie przedstawiono sposób integracji dwóch podsystemów. Opisy są dość ubogie w treść. Dla lepszego zobrazowania Doktorantka mogła użyć przykładowo schematów blokowych. Punkt 3.2 opisuje model bloku gazowo-parowego. Doktorantka nie trzyma dyscypliny w zakresie stosowanych oznaczeń. Przykładowo z uwagi na to błędny jest zapis równania (3.1). Błędny jest także zapis równania (3.19). Błędne jest równanie (3.22) oraz (3.23). Pojawia się także drobny błąd w zapisie jednostki wielkości fizycznej ( $\text{kJ/kgK}$  dla entalpii właściwej pod równaniem (3.20)). W punkcie 3.3 Doktorantka opisuje model podsystemu CAES. W tym przypadku nie potrafię znaleźć uzasadnienia dla stosowania modelu gazu doskonałego przy liczeniu obiegu cieplnego. Stosowanie takich wysokich stosunków ciśnień w obiegu, z jakimi mamy do czynienia w analizowanym systemie CAES, prowadzi do znaczących błędów w określaniu parametrów termodynamicznych, np. temperatur właściwych dla linii sprężania powietrza, co ma niebagatelne znaczenie w kontekście określanych efektów integracji cieplnej dwóch podsystemów. Niestety doktorantka nie poddała walidacjom opracowanych modeli, co mogłoby doprowadzić ją również do takich spostrzeżeń. I tutaj dochodzę do istotnej uwagi krytycznej. Hybrydyzacja na drodze integracji cieplnej systemów energetycznych prowadzi zazwyczaj do efektu synergii, gdzie pojawia się dodatkowa produkcja energii użytkowej lub oszczędność energii pierwotnej. Nie inaczej byłoby w przypadku analizowanego w doktoracie systemu. W świetle tak postawionej tezy nie jest właściwa definicja sprawności magazynowania energii (tzw. *Round-trip Efficiency*), wyrażona równaniem (3.24). Na etapie ładowania systemu magazynowania energii w systemie zintegrowanym, w którym ciepło chłodzenia powietrza sprężanego w podsystemie CAES wykorzystuje się w obiegu cieplnym bloku gazowo-parowego, identyfikowalna jest dodatkowa moc zespołu turbiny parowej lub, przy ograniczeniu obciążenia turbiny gazowej, pewna oszczędność strumienia energii chemicznej gazu ziemnego. Podobnie jest na etapie rozładowywania systemu magazynowania energii, kiedy to dla podgrzewu powietrza kierowanego do dwóch sekcji ekspandera zużywany jest w łańcuchu przemian gaz ziemny. Powinno to zostać uwzględnione w definicji sprawności. Wykorzystanie zaproponowanej przez Doktorantkę definicji sprawności byłoby bezużyteczne, przykładowo w procesie optymalizacji sposobu integracji podsystemów z punktu widzenia uzyskiwanej sprawności. Generalnie w ocenie recenzenta zagadnienia związane z efektami integracji zostały w pracy nadmiernie zmarginalizowane.

Rozdział 4. przedstawia algorytm obliczeniowy, jaki Doktorantka wykorzystwała w ramach optymalizacji. Przedstawiono tutaj również definicje wykorzystanych wskaźników oceny efektywności ekonomicznej, jak również założenia do analiz ekonomicznych. Bardzo wielka



szkoda, że doktorantka nie przeprowadziła analiz dla różnych scenariuszy założeń, np. takich uwzględniających zmianę poziomów cen energii w różnych okresach charakterystycznych doby, różnych poziomów kosztów inwestycyjnych, różnych cen paliwa gazowego. Opis metodologii pozostawia wiele do życzenia. Szkoda, że Doktorantka nie wykorzystwała w analizach wskaźnika oceny LCOS, o którym wspomina w rozdziale. Zasadne byłoby, do czego namawiam, przeprowadzenie analiz dla dodatkowego wariantu, który dotyczy systemów CCGT oraz CAES, dla których nie dokonano integracji. To powinien być punkt odniesienia dla oceny zasadności stosowania hybrydyzacji zarówno w kontekście zagadnień technicznych, jak i ekonomicznych.

W rozdziale 5. przedstawiono rezultaty optymalizacji. W kontekście uzyskanych efektów integracji, ale również założenia, które zostało przedstawione w rozdziale 4., a które dotyczyło kosztu rozruchu bloku gazowo-parowego, nasuwa się pytanie: na ile istotnym zagadnieniem natury poznawczej może być badanie zasadności dokonywania integracji z punktu widzenia zmniejszenia liczby odstawień bloku gazowo-parowego, skoro koszt takiego jednokrotnego odstawienia wynosi 12 tys. PLN, liczba odstawień w roku wynosi 13, a nakład inwestycyjny na system CAES wynosi 342 mln PLN? Analizy dotyczące zasadności integracji z systemami CAES dla ograniczenia kosztów rozruchowych były prowadzone dla krajowych bloków węglowych klasy 200 MW. Różnica polega tutaj jednak na tym, iż koszt odstawienia bloku węglowego to około 150 tys. zł., a liczba odstawień w roku takich bloków przekracza często poziom 40. W rozdziale Doktorantka przeprowadziła krótką dyskusję na temat uzyskanych rezultatów, które jak się można było spodziewać, z uwagi na wykorzystanie jako elementu generującego przychód wyłącznie mechanizmu arbitrażu cenowego (poza wspomnianą redukcją kosztu wynikającego ze zmniejszenia liczby odstawień) wskazują na brak zasadności dla realizacji inwestycji.

Rozdział 6. to rozdział podsumowujący całą pracę. Doktorantka zawarła w nim właściwie sformułowane wnioski. Doktorantka wskazuje również na potrzebę przeprowadzenia dalszych prac badawczych, co wydaje się uzasadnione także z tego względu, iż Doktorantka zbudowała warsztat, który pozwolił na osiągnięcie wszystkich zakładanych celów, a obszar potencjalnych badań nad przedmiotową integracją jest szeroki.

Przedłożona mi do recenzji praca nie odznacza się korzystną proporcją objętości części wprowadzającej w tematykę oraz części merytorycznej. O ile w części wprowadzającej Doktorantka często podejmuje się tematów marginalnie istotnych dla przedmiotu badań, to w części obliczeniowej niestety stosuje często skróty myślowe, szczególnie przy opisach metodologii. Również pewien niedosyt pozostawia przeprowadzona dyskusja.

### 3. Uwagi o charakterze redakcyjnym

Praca jest napisana językiem technicznym. Praca zawiera sporą liczbę błędów natury redakcyjnej. Dotyczy to głównie stosowania złych oznaczeń, błędnych zapisów równań, na które zwrócono już uwagę w punkcie 2 recenzji. Z punktu widzenia komfortu czytelnika nie jest właściwa również forma zapisu równań.

### 4. Podsumowanie

Przedstawiona mi do recenzji praca doktorska mgr inż. Sylwii Kruk-Gotzman podejmuje się tematyki bardzo istotnej z punktu widzenia bezpieczeństwa energetycznego kraju. Wybrane zagadnienie badawcze odznacza się wysokim poziomem nowości naukowej, co wnioskuje po przeprowadzeniu w tym zakresie przeglądu literatury przedmiotu. Doktorantka w istotny sposób rozwija tematykę dotyczącą hybrydyzacji systemów energetycznych z wykorzystaniem technologii magazynowania energii w sprężonym powietrzu, zgodnie z koncepcją, która pozwala wyeliminować trudny w adaptacji rynkowej system magazynowania ciepła. Po zapoznaniu się z treścią rozprawy wnioskuje, iż Doktorantka posiada wiedzę teoretyczną w obszarze termodynamiki oraz analiz rynkowych, włączając w to problematykę analiz ekonomicznych. Wiedza ta oraz zbudowany w oparciu o nią warsztat pozwoliły na udowodnienie tezy sformułowanej na początku pracy.

Pragnę podkreślić, iż sformułowane przeze mnie uwagi krytyczne odnoszące się do dysertacji nie mają wpływu na pozytywną jej ocenę. Będąca przedmiotem oceny 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* spełnia wymogi określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki. W związku z powyższym stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

Dr hab. inż. Łukasz Bartela, Prof. PŚ  
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych  
Politechnika Śląska

