Dr hab. inż. Piotr Krawczyk, prof. PW
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska
Warszawa

Warszawa, 27.04.2023

Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana mgr inż. Sebastiana Waniczka
„System magazynowania energii w sprężonym powietrzu sprofilowany na potrzeby dużych jednostek wytwórczych"

Promotor rozprawy dr hab. inż. Łukasz Bartela, prof. PŚ
Opiekun z ramienia przedsiębiorcy: dr inż. Marian Lipka

1. Wprowadzenie

Recenzja została przygotowana w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 16.02.2023, pismo znak RIE-BD.512.12.2023 w sprawie powierzenia mi opracowania recenzji przedmiotowej rozprawy.
Recenzja przygotowywana będzie w oparciu o następujące akty prawne:

- Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 poz. 1789 z późniejszymi zmianami);
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postepowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r. poz. 261);
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018r., poz. 1668 z późniejszymi zmianami).

Recenzja opracowana została na podstawie przekazanej wraz z w/w pismem rozprawy doktorskiej stanowiącej opracowanie zwarte.

2. Ogólna ocena rozprawy

2.1 Zakres rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Sebastiana Waniczka poświęcona jest badaniu systemu magazynowania energii elektrycznej w postaci sprężonego powietrza. Układem szczegółowo analizowanym w przedmiotowej dysertacji jest, magazyn wykorzystujący jako zbiornik magazynowania powietrza, wybrane elementy infrastruktury kopalnianej tj. głównie szyb. Analizowane układy są dodatkowo tak zwanymi układami adiabatycznymi tj. takimi, w których nie jest wykorzystywane ciepło zewnętrzne np. wynikające ze spalania paliwa.

Rozprawa została zawarta na 169 stronach tekstu zasadniczego. Pracę podzielono na siedem numerowanych rozdziałów. Praca zawiera również obszerny spis literatury obejmujący 164 pozycje, z czego przewagę stanowią pozycje anglojęzyczne. Znaczny udział cytowanych prac pochodzi z ostatnich lat, co świadczy o bardzo dobrym rozpoznaniu przez Doktoranta dorobku naukowego w zakresie merytorycznym przedmiotu rozprawy. W wykazie Doktorant umieścił 11 publikacje w których był współautorem, na które powołał się w pracy.

Praca zawiera również dwa obszerne załączniki, w którym Autor w sposób szczegółowy przestawił:

- wykaz podejmowanych na świecie projektów dotyczących magazynowania energii w sprężonym powietrzu wraz z ich podstawowymi parametrami oraz aktualnym statusem – załącznik nr 1;
- szczegółowe zestawienie wyników prowadzonych obliczeń – załącznik nr 2.

Pierwsze dwa rozdziały dysertacji zawierają informacje wprowadzające. W rozdziale numer jeden autor pracy przedstawia ogólna potrzebę magazynowania energii wynikającą z rosnącego, również w warunkach krajowego systemu elektroenergetycznego, udziału pogodowozależnych odnawialnych źródeł energii. Już na tym etapie przedstawia również pewne charakterystyczne parametry analizowanej technologii CAES (jak gęstość magazynowanej energii) w kontekście możliwości jej wykorzystania w odpowiedzi na pojawiający się popyt na magazynowanie.
Rozdział drugi zawiera cel i zakres pracy. Zgodnie z tytułem rozdziału Doktorant przedstawia w nim zakres analiz, które zamierza zrealizować. Stawia również tezę pracy mówiącą, iż technicznie możliwa jest budowa adiabatycznego systemu CAES ma terenie Polski, przy wykorzystaniu infrastruktury pokopalnianej.

W rozdziale **trzecim rozprawy,** autor przedstawia informacje dotyczące podstaw teoretycznych pracy magazynów energii w będącej przedmiotem rozprawy technologii CAES. Szczególną uwagę poświęca klasyfikacji systemów CAES ze względu na:

- zmienność ciśnienia w zbiorniku magazynującym powietrze w trakcie pracy instalacji;
- fakt oraz sposób wykorzystywania dodatkowego, zewnętrznego źródła ciepła w instalacji.

Omawia dosyć szczegółowo wszystkie trzy istniejące na świecie magazyny tego typu tj. dwie instalacje wielkoskalowe oraz posiadające już wieloletnią historię eksploatacji zlokalizowane w Huntorf (Niemcy) oraz McIntosh (USA), jak również najnowszy magazyn tego typu zlokalizowany w Kanadzie tj. instalację Goderich A-CAES.

W rozdziale czwartym pracy Doktorant prowadzi analizy nad wybranymi aspektami możliwości budowy instalacji CAES w Polsce. Rozpoczyna od szerokiego przeglądu struktur mogących być wykorzystanymi jako magazyny sprężonego powietrza. W tej części pracy Doktorant krytycznej analizie poddaje: naziemne zbiorniki magazynowe, kawerny solne, struktury porowate, warstwy wodonośne i wyeksploatowane złoża węglowodorów, komory skalne jak również nieczynne kopalnie. Logicznie argumentuje zasadność wykorzystanie infrastruktury pokopalnianej jako zasobu istniejącego. W drugiej części rozdziału Doktorant analizie poddaje możliwe do wykorzystania w badanej technologii sposoby magazynowania ciepła, pojawiającego się w wyniku sprężania powietrza. Ostatnia część rozdziału zawiera krótkie odniesienie się do dostępności oraz parametrów, koniecznych do budowy magazynu energii w technologii CAES, maszyn przepływowych tj. sprężarki i ekspandera.

W rozdziale piątym autor pracy szczegółowo omawia analizowaną i rozwijaną w ramach dysertacji koncepcję adiabatycznego układu CAES z wykorzystaniem tzw. zbiornika hybrydowego. Rozdział ten w opinii recenzenta jest najważniejszym rozdziałem pracy, stanowiącym o jej wartości merytorycznej.

Zbiornik, o którym mowa powyżej zgodnie z przedstawionymi informacjami ma możliwość magazynowania zarówno ciepła odpadowego z procesu sprężania jak i czynnika roboczego (sprężonego powietrza) jako takiego. W pierwszej części rozdziału autor przedstawia szczegółową analizę uwarunkowań budowlanych i konstrukcyjnych zabudowy przedmiotowej instalacji w warunkach infrastruktury kopalnianej. Definiuje oraz analizuje, również w oparciu o symulacje komputerowe, działania niezbędne do podjęcia celem adaptacji podziemnej części kopalni na potrzeby budowy magazynu energii (budowa korka szybowego oraz stopy szybowej). Doktorant poddaje również analizie mechanicznej moduł zasobnika ciepła. Dokonuje także ocen strat ciepła przez konstrukcję nośną zasobnika.

W drugiej części rozdziału Doktorant przedstawia sposób realizacji oraz wyniki wariantowych obliczeń bilansowych będącego przedmiotem pracy systemu ACAES.

W rozdziale szóstym Doktorant przedstawia podstawowe założenia, sposób realizacji obliczeń oraz wyniki wykonanej analizy ekonomicznej. Analiza ta prowadzona jest w celu oceny zasadności budowy magazynu, w rozważanej w pracy technologii, w warunkach

krajowych. Założenia do analizy obejmują m.in. ocenę nakładów inwestycyjnych na realizację przedmiotowej inwestycji.

Rozdział siódmy pracy zawiera podsumowanie w zakresie głównych osiągnięć naukowych omawianej dysertacji oraz uzyskanych wyników.

2.2 Ocena prawidłowości wyboru tematu

Problematyka poruszona w pracy, tj. magazynowania energii w skali systemowej jest bardzo istotna i aktualna. Polityka klimatyczna Unii Europejskiej zakłada stopniowe, acz dosyć dynamiczne odchodzenie od wykorzystania paliw kopalnych w sektorze wytwarzania energii, na korzyść źródeł odnawialnych. Immanentną cechą tych źródeł jest ich niestabilność pracy. W takiej sytuacji dla zbilansowania systemu konieczne jest posiadania wielkoskalowych magazynów energii. Analizowana w pracy technologia CAES jest jedną z kilku znanych technologii, posiadających odpowiedni potencjał. Ponadto, Doktorant dostrzegając specyfikę lokalnych uwarunkowań występujących w naszym kraju, przeprowadził szczegółowe rozważania możliwości zabudowy przedmiotowej instalacji z wykorzystaniem nieeksploatowanej infrastruktury kopalnianej. Zaprezentowane rozwiązanie zyskało tym samym dodatkowy potencjał wykorzystania drogiej, obecnej w naszym kraju niewykorzystywanej infrastruktury.
Mając na uwadze wyżej przytoczone argumenty, uznaję że temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Waniczka został wybrany prawidłowo, jako bardzo aktualny, a całość podjętej pracy wynikała nie tylko z problematyki naukowo-badawczej, ale nakierowana była również na osiągnięcie potencjalnych efektów praktycznych.

3. Analiza treści rozprawy wraz z uwagami krytycznymi

W niniejszym rozdziale recenzji skupiam się na zagadnieniach naukowych samodzielnie rozwiązanych przez Doktoranta, krytyce prawidłowości rozważań zawartych w pracy, pozyskanych wynikach i wnioskach przedstawionych przez Doktoranta. Przedstawię pewne uwagi dyskusyjne i wątpliwości, które nasunęły mi się podczas lektury rozprawy. Przedstawię również uwagi na temat oryginalności rozprawy jak i wskaże główne walory rozprawy.

3.1 Zagadnienia naukowe i utylitarne rozwiązane samodzielnie przez Doktoranta

Po przeprowadzeniu analizy treści rozprawy stwierdzam, że postawiony przez Doktoranta cel pracy został zrealizowany.

Do najważniejszych zagadnień naukowych zrealizowanych przez Doktoranta zaliczam:

- krytyczną analiza możliwości technicznych budowy magazynów w technologii CAES w warunkach polskich;

- udział w opracowaniu innowacyjnej koncepcji jednoczesnego magazynowania ciepła i sprężonego powietrza na potrzeby funkcjonowania CAES z wykorzystaniem istniejącej infrastruktury pokopalnianej;
- realizację obliczeń wytrzymałościowych weryfikujących niektóre aspekty wykorzystania szybów kopalnianych jako hybrydowych magazynów ciepła i sprężonego powietrza;
- realizację wariantowych obliczeń bilansowych oraz określenie na ich podstawie zestawu rekomendowanych parametrów konstrukcyjnych układu;
- realizację analiz ekonomicznych obrazujących zasadność finansową budowy magazynów energii w będącej przedmiotem pracy technologii.

3.2 Uwagi krytyczne do pracy

Treść rozprawy dowodzi, że Doktorant bardzo dobrze orientuje się w przestawionej problematyce. Nie stwierdzam w tym zakresie uchybień i oceniam znajomość przedmiotu zagadnienia przez Doktoranta, w tym jego przygotowanie zawodowe i naukowe – bardzo pozytywnie.

Poniżej zamieszczam uwagi o charakterze merytorycznym z podziałem na poszczególne rozdziały do których te uwagi się odnoszą:

Rozdział 1:

- Na stronie 12 Doktorant przedstawia tabelę 1.1 mówiącą o ilości energii produkowanej w Polsce. Pewne wątpliwości recenzenta budzą wartości zamieszone w tabeli. Jako roczna produkcja energii elektrycznej ze wszystkich dostępnych źródeł np. dla roku 2020 wskazana jest tam wartość 14 659,6 GWh. Tymczasem wg oficjalnych statystyk produkcja energii elektrycznej w tym roku wyniosła ok 152000 GWh.

- Na tronie 14 Doktorant wskazuje, że jedynymi systemami, które są w stanie konkurować z magazynami szczytowo - pompowymi są magazyny w technologii CAES. Co w takim razie Doktorant myśli o technologii LAES?

Rozdział 5:

- W rozdziale 5 Doktorant szczegółowo opisuje będącą przedmiotem badań w doktoracie koncepcję magazynu hybrydowego, dedykowanego do wykorzystania w układzie ACEAS. Podaje informacje, że koncepcja została opracowana przez szeroki zespół pracowników Politechniki Śląskiej. Prosiłbym w takim razie o doprecyzowanie roli Doktoranta w powstaniu będącej przedmiotem dysertacji koncepcji magazynu.

Podobnie nie do końca jest jasna dla recenzenta rola Doktoranta w tworzeniu kolejnych wersji zasobnika oznaczanych jako wersje EPK_TES. Przy prezentacji rysunkowej tych magazynów (rys. 5.11 – rys. 5.16) Doktorant nie powołuje się na żadne źródła. Z opisu wynika natomiast, że za prace nad kolejnymi modyfikacjami odpowiedzialny był większy zespół.

- Na stronach 68 i 69 Doktorant opisuje przyjętą koncepcję odbioru ciepła z chłodnicy międzystopniowej sprężarki na cele ciepłownicze. Argumentuje, że ze względu na spodziewaną wysoką temperaturę sprężonego powietrza przekraczającą 200°C i stosunkowo niskie ciśnienie w rurociągu powrotnym magistrali ciepłowniczej istnieje ryzyko odparowania wody w wymienniku. Argumentuje dalej, że dla uzyskania bezpieczeństwa pracy należałoby to ciśnienie podnieść do 2,0 MPa(g). Pewne wątpliwości recenzenta budzi przyjęcie tego sposobu rozumowania. Czy nie można zabezpieczyć się przed potencjalnym odparowaniem czynnika poprzez zwiększenie jego przepływu?

- Rozważana koncepcja układu magazynowania sprężonego powietrza i ciepła zakłada współpracę ze sprężarką dwustopniową i kierowanie do magazynu ciepła zawartego w powietrzu po drugim stopniu sprężania. Ciepło z chłodnicy międzystopniowej jest alternatywnie zagospodarowywane na inne cele (sieć ciepłownicza) albo rozpraszane. Prośba o doprecyzowanie jaka część ciepła generowanego w czasie całego procesu sprężania jest zatrzymywana w układzie CAES (magazynowana) a jaka jest wyprowadzana z układu?

- W kontekście poprzedniego pytania, prośba o informację jak zmieniłby się sens i zasadność wykorzystania analizowanej w pracy koncepcji magazynu hybrydowego w przypadku stosowania w układzie ładowania magazynu, sprężarki wielostopniowej tj. o liczbie stopni większej od 2 z chłodzeniem pomiędzy stopniami? Podwyższanie liczby stopni sprężarki prowadzi do poprawy sprawności procesu sprężania, ale zgonie z moim rozumieniem opisywanej koncepcji będzie prowadziło do zmniejszenia strumienia ciepła kierowanego do magazynu.

- W rozdziale 5.1.1 Doktorant opisuje wyniki badań uzyskanych przez pracowników Katedry Geoinżynierii i Eksploatacji Surowców Politechniki Śląskiej. Przedstawia m.in. szereg wykresów stanowionych wyniki tej analizy (np. rysunki 5.5 do 5.9). Do rysunków tych nie jest jednak przypisane żadne źródło. Co więcej w tekście opisującym rysunki znajduje się wiele stwierdzeń mogących sugerować, udział Doktoranta w prowadzonych analizach np.

    - „Rysunek 5.6. przedstawia miejsca monitorowania przemieszczeń, gdzie Autor, na potrzeby analizy, wprowadził odpowiednie sensory….”

- Dodatkowo, w celu odwzorowania długiego okresu istnienia szybu jako wyrobiska górniczego i ustalenia się stanu naprężenia, przemieszczenie, odkształcenia i wytężenie, wykonana przez Autora została symulacja …..”

Prośba o odniesienie się do sprawy.

- W rozdziale 5.2.2. na stornie 92 Doktorant prezentuje przyjęte założenia do prowadzonych obliczeń wytrzymałościowych stopy szybowej. Wśród założeń pojawia się informacja o łącznej wadze TES równiej 5000 kg. Tak mała masa magazynu budzi wątpliwości. Jaka jest pojemność cieplna magazynu? Czy jest to błąd pisarski? Prośba o wyjaśnienie.

- W tym samym rozdziale tj. 5.2.2 Doktorant penetruje wyniki obliczeń wytrzymałościowych korka szybowego oraz stopy oporowej. Jak rozumiem obliczenia są wykonane z wykorzystaniem oprogramowania bazującego na MES. Przyjęte założenia szczegółowe oraz ustawienia modelu zostały opisane jednak bardzo lakoniczne. Doktorant nie przywołuje np. żadnych parametrów wykorzystywanej siatki obliczeniowej. Nie odnosi się do testu niezależności siatki i jej wpływu na wyniki obliczeń. Prośba o odniesienie się do tych zagadnień.

- W rozdziale 5.4 Doktorant prezentuje założenia oraz wyniki wariantowych obliczeń bilansowych modelowanych układów ACAES. We wszystkich rozważanych wariantach zakłada jednostopniowy ekspander. Co Doktorant myśli o wykorzystaniu ekspandera wielostopniowego z międzystopniowym podgrzewem czynnika (powietrza) ciepłem pochodzącym np. z międzystopniowego chłodzenia sprężarki?

Podkreślić należy, że wskazane uwagi nie umniejszają znacząco wartości naukowej pracy. Przedstawiony cel pracy został osiągnięty, zakres pracy także umożliwił recenzentowi odpowiednie odniesienie się do postawionego problemu badawczego.

Praca jest starannie zredagowana, niemniej jednak w czasie lektury dostrzegłem pewne potknięcia stylistyczne i redakcyjne. Przykłady przedstawiam poniżej:

- Strona 11 – „zmuszane do częstszych przejęcia”

- Strony 25 – 29 – Doktorant przywołuje szereg równań opisujących zachowanie się poszczególnych komponentów układu CAES (np. równanie 3.3, 3.4, 3.5, 3.6) nie powołując się na żadne źródło na podstawie których te równania zostały zapisane. W opinii recenzenta właściwsze byłoby odwołanie się do źródeł. Podobna uwaga dotyczy szeregu innych fragmentów doktoratu np. równań 4.1, 4.2, 5.31, 5.32

- Strona 33 – Doktorant pisze „W wielu publikacjach pojawia się sprawność tego systemu na poziomie ok 75%.” Niestety nie podaje w jakich publikacjach. Zasadne byłyby podać przykłady.

- Strona 34 – „koncepcją hybrydowa”
- Strona – 41 – prezentowany jest rysunek 3.11 przedstawiający instalację Hydrostor Goderich A-CAES. Doktorant nie przedstawił źródła tego rysunku.
- Strona 51 – „od materiału górotworu w jakim były drożne tunele”
- Strona 138 – Na rysunku 5.44. przedstawiono 4 krzywe. Legenda wykresu opisuje jedynie dwie z nich. Co przedstawiają dwie pozostałe krzywe?
- Strona 139 – podpis osi poziomej na rysunku 5.45 sugeruje, że wartości stanowią sumaryczny czas ładowania i rozładowania magazynu? Czy tak należy rozumieć rysunek?

3.3 Oryginalność pracy i jej główne walory

Doktorant zrealizował bardzo szeroki zakres prac zarówno badawczych jak i konstrukcyjnych, uzyskując wyniki pozwalające na pełniejsze rozumienie pracy magazynów energii w technologii CAES, zabudowanych z wykorzystaniem infrastruktury pokopalnianej.

Zakres zrealizowanych prac stanowi oryginalny dorobek Doktoranta a uzyskane wyniki dostarczają wniosków, które mogą być przydatne na etapie wdrażania badanych magazynów.

Uzyskany w trakcie realizacji pracy materiał jest wartościowy i z pewnością wart dalszej popularyzacji poprzez np. zaprezentowanie uzyskanych wyników na konferencjach naukowych czy w czasopismach.

4. Wnioski końcowe

Zdaniem recenzenta, przedstawiona do recenzji praca oraz dotychczasowy dorobek naukowy Autora w pełni spełniają wymagania stawiane do uzyskania tytułu doktora nauk technicznych określone w Art. 13.1 przywołanej w pkt. 1 Ustawy [3] warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Praca poświęcona jest zagadnieniu w pełni aktualnemu, wpisując się w prowadzone w szeregu ośrodkach krajowych i zagranicznych badania związane z magazynowaniem energii elektrycznej w skali systemowej. W pracy otrzymane zostały wartościowe wyniki, które zdaniem recenzenta mogą znaleźć wdrożenie w przemyśle.

Reasumując, pomimo pewnych uwag merytorycznych, jednak nie umniejszających istotnie wartości otrzymanych wyników, recenzent wnioskuje o dopuszczenie pracy Pana mgr Sebastiana Waniczka do publicznej obrony.

Recenzent jednocześnie **wnioskuje o wyróżnienie pracy**. Swój wniosek opieram na bardzo szerokim zakresie prac przeprowadzonych przez Doktoranta, zaprezentowanych w rozprawie. Na szczególne uznanie zasługuje zaplanowanie oraz przeprowadzenie pełnego cyklu badawczego przez Doktoranta poczynając od udziału w tworzeniu koncepcji bardzo ciekawego rozwiązania pozwalającego na wykorzystanie istniejącej infrastruktury pokopalnianej w innowacyjny sposób, poprzez realizację badań symulacyjnych związanych z aspektami wytrzymałościowymi analizowanego rozwiązania i badań bilansowych celem wytypowania pożądanych parametrów operacyjnych poszczególnych, głównych komponentów technologii, a na przeprowadzeniu analiz ekonomicznych zasadności pracy magazynu kończąc. Praca zawiera ponadto wszechstronną i dogłębną analizę uzyskanych przez Doktoranta wyników.

Z poważaniem

Dr hab. inż. Piotr Krawczyk, profesor PW