

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Rafała Hyrzyńskiego pt.:
Modelowanie i optymalizacja magazynów energii, w tym magazynów
energii cieplnej, w systemie energetycznym z generacją ze źródeł
trudno prognozowalnych

1. Podstawa prawna

Niniejsza recenzja została opracowana w oparciu o nadesłany egzemplarz rozprawy doktorskiej przez Z-cę Dyrektora ds. naukowych dr. hab. Grzegorza Żywicę profesora IMP PAN w Gdańsku. Podstawą do jej opracowania jest uchwała Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych IMP im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku z 14 czerwca 2022r. o wyborze recenzenta, o czym recenzent został poinformowany pismem z 20 czerwca 2022r. Opinię wykonano w oparciu o art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003r. O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuk (Dz. U. z 2017r. Poz. 1789 w związku z art. 179 ust.1 i ust.2 ustawy z dnia 3 lipca 2018r. Przepisy wprowadzające ustawę- Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. Z 2018r. poz 1669 z późn. zm.).

2. Tematyka rozprawy

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej jest ukierunkowana na badania i poszukiwania możliwości praktycznego zastosowania nowych technologicznych rozwiązań dla odnawialnych źródeł energii. Źródłem inspiracji dla podjęcia tematyki dysertacji przez doktoranta były między innymi światowe trendy aktualnych problemów w obszarze energetyki. Doktorant podjął się zadania, które w znaczący sposób wpisuje się w realizację strategicznego celu wyznaczonego przez Unię Europejską dekarbonizacji gospodarki i osiągnięcia neutralności klimatycznej gospodarek w perspektywie do 2050r. Przy wyborze tematyki doktorant opierał się na cennych wskazówkach zarówno promotora Pana prof. dr. hab. Janusza Badura i wieloletniego dyrektora IMP PAN w Gdańsku Pana prof. dr. hab. Jana Kicińskiego.

3. Ogólna charakterystyka pracy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska zawiera łącznie 437 stron, w tym 203 rysunki, 75 tabel oraz 695 pozycji bibliograficznych i 270 przypisów. Składa się z 10

rozdziałów. Zawiera spis treści, wykaz oznaczeń, wykaz skrótów oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

W rozdziale 1 doktorant przedstawił cel i zakres rozprawy. Sformułował tezę rozprawy, że możliwa jest praca polskiego systemu elektroenergetycznego ze 100 procentowym udziałem energii generowanej przez źródła odnawialne, w tym trudno prognozowalne współpracujące z magazynami energii. Celem głównym, który wyznaczył doktorant w recenzowanej pracy było wskazanie i udowodnienie możliwości połączenia technologii magazynowania energii z docelową opcją jej konwersji na energię elektryczną z magazynami energii termicznej. Przed wyborem technologii dla magazynów energii doktorant dokonał przeglądu literatury, przeanalizował skalę wdrożeń biznesowych i ograniczeń natury techniczno prawnych. Prowadził również wiele dyskusji z przedstawicielami środowisk naukowych i biznesowych. Wykorzystał także własną wiedzę i bogate doświadczenie zawodowe.

Rozdział 2 pt.: „*Energetyka odnawialna jako element polityki energetyczno-klimatycznej*” zawiera około 100 stron i został podzielony na 5 podrozdziałów: 1. *Polityka globalna*, 2. *Polityka wspólnot europejskich*, 3. *Megatrendy*, 4. *Polska strategia dla obszaru energetyki*, 5. *Wnioski*

Doktorant przeanalizował bardzo liczne dokumenty dotyczące polityki, strategii i transformacji sektora energetycznego, niezależnie od miejsca ich wdrażania (ONZ, Unia Europejska, Polska).

W rozdziale 3 i 4 doktorant dokonał przeglądu technologii odnawialnych źródeł wytwórczych, w tym fotowoltaicznych, wiatrowych, wodnych oraz przeglądu technologii magazynowania energii. W tym celu wykorzystał przegląd literatury, dane statystyczne, handlowe, techniczne, eksploatacyjne i operacyjne.

W rozdziale 5 doktorant przedstawił dane dotyczące cykliczności i trendów zapotrzebowania na energię elektryczną z uwzględnieniem różnych czynników, także trudno prognozowalnych odnawialnych źródeł energii.

W rozdziale 6 zaprezentowane zostały charakterystyki pracy trudno prognozowalnych odnawialnych źródeł energii w elektrowniach wiatrowych i fotowoltaicznych.

Rozdział 7 pt.: *Optymalizacja mocy magazynów energii współpracujących z odnawialnymi źródłami energii w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym* zawiera studium ogólnosiłkowej literatury naukowej i wdrożeniowej. Wobec rosnącego udziału odnawialnych źródeł energii w wytwarzaniu energii elektrycznej, w szczególności ze źródeł trudno prognozowalnych i ich wpływu na funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego, doktorant podjął się oceny współzależności generowania energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych i fotowoltaicznych rozproszonych na znacznym obszarze w warunkach morfologicznych i klimatycznych zbliżonych do polskich. Wykorzystał zależności podane we wzorach 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 do opracowania modelu matematycznego i oprogramowania w celu wyznaczenia

współczynników korelacji dla generacji elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych oraz generacji energii z wyżej wymienionych źródeł i zapotrzebowania krajowego systemu elektroenergetycznego. Przeprowadził także badania symulacyjne ukierunkowane na wyliczenie mocy i pojemności magazynów z udziałem odnawialnych źródeł energii wynoszących odpowiednio 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 98, 99, 100 % odnawialnych źródeł energii, a wyniki przedstawił na wykresach (rys 126-139). Prace badawcze opisane w dysertacji wpisują się w obecną strategię ukierunkowaną na dekarbonizację energetyki opartej o odnawialne źródła energii, co wymaga przystosowania systemu elektroenergetycznego do możliwości pełnego ich wykorzystania z zapewnieniem przewidywalnej generacji energii oraz zapewnienia bezpieczeństwa i stabilnej pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego.

W rozdziale 8 doktorant przedstawił koncepcję hybrydowego modelu magazynu energii będącego połączeniem magazynu energii w postaci sprężonego powietrza (CAES) z podziemnym magazynem energii termicznej (UTES), zbudowanego z wielu podziemnych wymienników ciepła (UHE) (rys.141). Szczegółowo opisał poszczególne etapy badań, z których wstępny opierał się na jego własnym uproszczonym modelu ograniczonym do układu z rekuperacją ciepła spalin wylotowych z turbiny gazowej i przyjął parametry termodynamiczne stosowane w istniejących instalacjach, zarówno dla turbiny gazowej jak i kompresora (rys.140). Uzyskane wyniki wykorzystał w następnym etapie badań do symulacji zasadniczych, mających na celu przeprowadzenie analizy termodynamicznej dwóch układów bez regeneracji i z regeneracją ciepła, z zastosowaniem profesjonalnych narzędzi symulacyjnych. Po analizie wyników opracował trójwymiarowy termodynamiczny model magazynowania energii termicznej, który współpracując z magazynem sprężonego powietrza wypełnia warunki brzegowe zaproponowanego magazynu energii będącego połączeniem magazynu energii w postaci sprężonego powietrza z podziemnym magazynem energii termicznej, zbudowanego z wielu podziemnych wymienników ciepła. Prace badawcze doktorant przeprowadził z uwzględnieniem wpływu różnorodnych parametrów termodynamicznych na funkcjonowanie zaproponowanych modeli matematycznych magazynu energii. Stanowią one kontynuację prac naukowo-badawczych doktoranta opartych o metodologię badań zainicjowaną przez Pana prof. Janusza Badura, promotora niniejszej pracy, a także na bazie prac doktoranta opublikowanych w latach 2019-2021, we współpracy naukowej z wysokospecjalistycznym i doświadczonym zespołem IMP PAN w Gdańsku, pod kierownictwem Pana prof. Janusza Badura oraz Pana prof. Jana Kicińskiego. Wyniki uzyskanych przez doktoranta badań dowiodły możliwości połączenia technologii magazynowania energii z docelową opcją konwersji na energię elektryczną z magazynami energii termicznej. Zaprezentowany przez doktoranta hybrydowy magazyn energii otwiera drogę do poszukiwania optymalnych warunków wdrożeniowych, wymagających ograniczania nakładów inwestycyjnych oraz poszukiwania możliwości wykorzystywania w większym stopniu energii termicznej.

W rozdziale 9 doktorant omówił ważne aspekty problematyki ekonomicznej ściśle związanej z energetyką odnawialną i magazynami energii. Tematycznie rozdział został podzielony na 4 podrozdziały. Pierwszy z nich dotyczy zagadnień finansowych transformacji energetycznej i przedstawia mechanizmy zainicjowane przez ONZ. Zaproponowany przez Unię Europejską podział środków finansowych w ramach Planu odbudowy dla Europy, z uwzględnieniem finansowania transformacji energetycznej, doktorant zamieścił w tabelach 45-47.

W dalszych podrozdziałach przeprowadził analizę przypadku współpracy magazynu energii z trudno prognozowanymi źródłami odnawialnymi, uwzględniając wieloaspektowość oraz trudności organizacyjne występujące w procesie rozwoju magazynów energii. Omówił szeroko parametry techniczne i ekonomiczne magazynów energii wykorzystujących elektrochemiczny zasobnik energii w technologii ogniw kwasowo-ołowiowych, siarkowo-sodowych oraz litowo-jonowych. Dobór parametrów technicznych dla wyżej wymienionych magazynów energii doktorant zamieścił w tabelach 52-57, dobór mocy i pojemność w tabeli 58, a wyliczenia nakładów niezbędnych na ich budowę w tabli 59. Bilans mocy dla analizowanego przypadku, biorąc pod uwagę farmy wiatrowe, zaprezentowany został dla okresu letniego i jesienno-zimowego. Dalsze podrozdziały zawierają kolejno analizę uzasadnienia biznesowego oraz przychody z magazynów energii z uwzględnieniem arbitrażu cenowego oraz przychodów z magazynów energii opartych o różne moduły technologiczne. W ostatnim 5 podrozdziale zatytułowanym *Wyniki finansowe oraz opłacalność inwestycji w magazyny energii* doktorant przedstawił przepływy pieniężne dla analizowanych różnych wariantów magazynów energii w trybie pracy na Rynek mocy i wykorzystaniu arbitrażu cenowego oraz w trybie pracy na Rynek mocy oraz bilansowaniu odnawialnych źródeł energii (wykresy na rys. 199-204). W podsumowaniu wyników przeprowadzonej analizy doktorant wskazuje na obecny zbyt niski poziom nakładów inwestycyjnych dla magazynów energii dla osiągnięcia akceptowalnej stopy wzrostu.

Na podkreślenie zasługuje ogrom pracy włożonej przez doktoranta dla opracowania ekonomicznych podstaw procesów związanych z modernizacją i wdrażaniem nowoczesnych rozwiązań technologicznych niezbędnych dla dalszej realizacji szeroko rozumianego procesu transformacji energetycznej.

Rozdział 10 zawiera podsumowanie i wnioski końcowe dotyczące przeprowadzonych badań.

4. Ocena redakcji pracy

Opracowanie redakcyjne rozprawy jest bardzo staranne. Dysertacja napisana jest poprawnym językiem z użyciem słownictwa naukowo-technicznego i ekonomicznego z użyciem nazewnictwa w języku polskim i angielskim. Zamieszczenie przez doktoranta 270 przypisów w znaczący sposób ułatwia czytelnikowi zrozumienie prezentowanej tematyki. Kilkanaście błędów literowych, które znalazły się w tekście nie wpływa na pozytywną jej ocenę.

5. Ocena osiągnięć

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter badań naukowo-badawczych i wdrożeniowych zmierzających docelowo do osiągnięcia zerowego poziomu emisji gazów cieplarnianych w 2050r. Doktorant dokonał wszechstronnego przeglądu literatury z wielu obszarów badań naukowych obejmujących analizę polityk, strategii, megatrendów.

Bardzo wysoko oceniam zawarte w dysertacji opracowane i przetestowane przez doktoranta modele matematyczne oraz analizy przeprowadzonych symulacji i wyników badań własnych, które stanowią podstawę do stwierdzenia, że doktorant dowiódł prawdziwości postawionej tezy, że możliwa jest praca systemu elektroenergetycznego ze 100-procentowym udziałem energii generowanej przez trudno prognozowalne o zmiennym profilu generacji energii elektrycznej, we współpracy z magazynami energii. Otwiera to możliwości dalszego poszerzenia prac badawczo-wdrożeniowych, mających na celu systematyczne zwiększanie udziału odnawialnych źródeł energii w produkcji energii elektrycznej.

Z powodzeniem zrealizował także postawione cele. W oparciu o opracowany trójwymiarowy model termodynamiczny i inne powiązane z nim modele matematyczne oraz przeprowadzoną analizę uzyskanych wyników badań doktorant dowiódł możliwości połączenia technologii magazynowania energii, z docelową opcją jej konwersji na energię elektryczną, w połączeniu z magazynami energii termicznej. Zaprezentowany przez doktoranta hybrydowy model magazynu energii otwiera drogę do poszukiwania optymalnych warunków wdrożeniowych, wymagających ograniczenia nakładów inwestycyjnych niezbędnych do jego budowy jak i poszukiwania możliwości wykorzystania w większym stopniu energii termicznej.

Doktorant szeroko rozwinął zagadnienie korelacji w generacji energii elektrycznej przez trudno prognozowalne, odnawialne wiatrowe i solarne źródła energii oraz zbadał ich naturę. Za istotne należy uznać wnioski doktoranta, że mimo występującej istotnej negatywnej korelacji pomiędzy mocami generowanymi w elektrowniach wiatrowych i fotowoltaicznych, istnieją w warunkach polskich możliwości praktycznego zwiększania wykorzystania energii z trudno prognozowalnych odnawialnych źródeł energii opierające się na idei współdzielenia infrastruktury energetycznej pomiędzy elektrownie wiatrowe i fotowoltaiczne, co stwarza realne szanse na odblokowanie możliwości przyłączenia do Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. Za słuszny należy uznać sformułowany przez doktoranta wniosek o konieczności dalszych działań umożliwiających wdrożenie do polskiego systemu prawnego idei cable poolingu.

Należy podkreślić, że doktorant obok podejścia naukowo-technicznego wziął pod uwagę niezwykle ważne czynniki ekonomiczne, związane z energetyką odnawialną i magazynami energii. Opracowane przez niego wskaźniki ekonomiczne dla wybranych technologii magazynów energii jak i wskaźniki efektywności ekonomicznej dla realizacji inwestycji polegających na budowie elektrochemicznych zasobników energii, stanowią mogą sprzyjające warunki do wdrażania przez inwestorów opracowań naukowo-technicznych w kontynuacji rozpoczętego procesu dekarbonizacji gospodarki.

6. Wniosek końcowy

Doktorant zrealizował założony bardzo szeroki program badawczy wykazując się zarówno opanowaniem interdyscyplinarnych zagadnień teoretycznych, umiejętnością samodzielnego, a także zespołowego prowadzenia prac naukowo-badawczych i właściwej interpretacji uzyskanych wyników.

Dowiodł słuszności tezy i z powodzeniem zrealizował postawione cele i zadania. Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa pt.: *Modelowanie i optymalizacja magazynów energii, w tym magazynów energii cieplnej, w systemie energetycznym z generacją ze źródeł trudno prognozowalnych* spełnia aktualne warunki ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie mgr. inż. Rafała Hyrzyńskiego do publicznej obrony pracy doktorskiej.

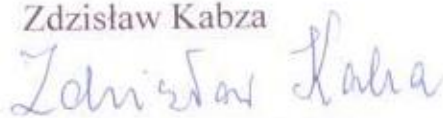
7. Wniosek o wyróżnienie pracy

Pragnę podkreślić bardzo wysoki poziom naukowy recenzowanej pracy doktorskiej mgr. inż. Rafała Hyrzyńskiego, jak również bogactwo trudnych i czasochłonnych badań, które odpowiadają na aktualne potrzeby powstrzymania postępujących zmian klimatycznych. Dysertacja obejmuje wiele obszarów badań, a w szczególności dotyczących technologii magazynowania energii, co przyczyni się do przyspieszenia procesu transformacji energetycznej prowadzącej do dekarbonizacji gospodarki opartej na odnawialnych źródłach energii i osiągnięcia neutralności klimatycznej.

Na uwagę zasługuje także bogaty dorobek publikacyjny i wdrożeniowy doktoranta. W bibliografii rozprawy doktorskiej znajduje się 20 publikacji autorskich i współautorskich, w tym osiem w języku angielskim.

Z tych względów w mojej ocenie rozprawa doktorska zasługuje na wyróżnienie i taki wniosek stawiam.

Zdzisław Kabza



Wydział Elektrotechniki
Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska