

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lubośny
Katedra Elektroenergetyki
Wydział Elektrotechniki i Automatyki
Politechnika Gdańska
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 15 września 2022 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Rafała Stanisława Hyrzyńskiego,
pt. „Modelowanie i optymalizacja magazynów energii, w tym magazynów energii cieplnej,
w systemie energetycznym z generacją ze źródeł trudno prognozowalnych”**

Promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Badur

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Rafała Stanisława Hyrzyńskiego, pt. „Modelowanie i optymalizacja magazynów energii, w tym magazynów energii cieplnej, w systemie energetycznym z generacją ze źródeł trudno prognozowalnych”, została opracowana na podstawie:

- Pisma dyrektora Instytutu Maszyn Przepływowych dra hab. Marcina Lackowskiego, prof. IMP PAN z dnia 13 lipca 2022 r. oraz umowy o dzieło na recenzję rozprawy doktorskiej.
- Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r., Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z dnia 30 sierpnia 2018 r., poz. 1669, z późn. zm.).
- Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r., Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z dnia 30 sierpnia 2018 r., poz. 1668, z późn. zm.).
- Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (jednolity tekst ustawy Dz. U. z dnia 21 czerwca 2016 r., poz. 882, z późn. zm.).

Oceniana rozprawa doktorska została przedstawiona w postaci drukowanej na 415 stronach. Po stronie tytułowej znajdują się strony: zawierające podziękowania (1 strona), spis treści (4 strony), wykaz oznaczeń (2 strony), wykaz skrótów (5 stron) oraz dwa streszczenia – pierwsze w języku polskim (5 stron), drugie w języku angielskim (5 stron). Po wstępie (4 strony), znajduje się 9 zasadniczych rozdziałów rozprawy, kończących się podsumowaniem i wnioskami końcowymi. Bibliografia obejmuje 695 pozycji (45 stron), a pracę kończą: spis tabel (3 strony) i spis rysunków (9 stron). Praca jest obszerna ale kolejność rozdziałów oraz podział treści na poszczególne rozdziały nie budzą zastrzeżeń.

1. Problem naukowy (teza) rozprawy i trafność oraz jasność jego sformułowania

Rozprawa dotyczy pracy systemów elektroenergetycznych w warunkach rozwoju odnawialnych źródeł energii (OZE) w sensie wzrostu nasycenia nimi systemów elektroenergetycznych, a właściwie źródeł konwertujących energię promieniowania słonecznego i strumienia powietrza na energię elektryczną. Problem ten jest aktualny ze względu na efekt cieplarniany oraz wyczerpywanie się paliw kopalnych jak węgiel, ropa naftowa i gaz ziemny (a w tym ze względu na ograniczony dostęp do tych paliw uwypuklony wojną w Ukrainie). Skutkiem powyższego jest wspierana/kreowana politycznie transformacja systemów elektroenergetycznych.

Autor zaproponował następującą tezę pracy: *możliwa jest praca systemu elektroenergetycznego ze 100% udziałem energii generowanej przez źródła odnawialne, w tym trudno prognozowalne (w dużym nasyceniu) o zmiennym profilu generacji energii elektrycznej, współpracujące z magazynami energii.*

Pozorną trywialność tezy (bo przecież elektrownie wodne też należą do OZE) eliminuje wskazanie, że chodzi tu o systemy elektroenergetyczne o dużym nasyceniu źródłami trudno prognozowanymi jakimi są elektrownie fotowoltaiczne i wiatrowe.

Tak sformułowana teza (rozdział 1.2) wraz z celami które Autor zamierzał osiągnąć (rozdział 1.1) oraz zakres merytoryczny rozprawy (rozdział 1.3) uzasadniają stwierdzenie, że problem naukowy

rozprawy należy uznać za trafnie i jasno sformułowany, a zakres pracy za poprawnie, z naukowego punktu widzenia, określony.

2. Ocena rozwiązania postawionego problemu, w tym zastosowanych metod oraz ocena umiejętności Autora związanych z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych

Dla osiągnięcia celu rozprawy i udowodnienia postawionej tezy Autor założył przeprowadzenie następujących działań i przeprowadził je:

- Przegląd literatury w zakresie od publikacji dotyczących teorii kreowania myśli i strategii politycznej poprzez akty prawne (szczebla ONZ, unijnego i krajowego) do publikacji technicznych (technologie OZE i magazyny energii, a w tym modelowanie matematyczne tych obiektów).
- Analizę zapotrzebowania na moc i energię elektryczną na poziomie globalnym, kontynentalnym i krajowym, w celu określenia potencjału do rozwoju poszczególnych technologii.
- Określenie charakteru korelacji generacji energii elektrycznej źródeł wiatrowych i fotowoltaicznych.
- Określenie optymalnego stosunku mocy zainstalowanej źródeł wiatrowych i fotowoltaicznych.
- Określenie mocy i pojemności magazynów energii niezbędnej do pracy systemu elektroenergetycznego z dużym nasyceniem OZE wiatrowymi i fotowoltaicznymi.
- Opracowanie koncepcji i wykonanie obliczeń symulacyjnych modelu matematycznego magazynu energii współpracującego z magazynem energii termicznej.
- Analizę ekonomiczną dla inwestycji z magazynem energii o wybranej technologii.

Powyższe wskazuje na bardzo szerokie spektrum działań Autora, wymagające zastosowania różnych metod naukowych. Do rozwiązania postawionego problemu zastosowano właściwe metody, w tym z autorskimi modyfikacjami. Autor wykazał się bardzo dobrym przygotowaniem merytorycznym i wysokimi umiejętnościami w zakresie metodyki i metodologii prowadzenia badań naukowych.

Równocześnie można stwierdzić, że problem badawczy (naukowy) został rozwiązany prawidłowo.

Należy tu podkreślić, że prace naukowe i techniczne związane z pracą systemów elektroenergetycznych z rosnącym nasyceniem OZE są realizowane od lat. Obecnie ich, tj. samych tych prac jak i OZE, istotność dla współczesnych systemów elektroenergetycznych zaczyna mieć charakter krytyczny. Autor w rozprawie podaje wskaźniki wykorzystania elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych. Trafnie przy tym zauważa, a w rozprawie udowadnia, możliwość jednoczesnego przyłączania tych źródeł to danego węzła systemu. Nie dostrzegają tego jeszcze krajowi operatorzy systemów elektroenergetycznych (choć w innych krajach staje się to zasadą) co prowadzi do blokady rozwoju OZE w kraju. Jest to bardzo ważny wniosek wynikający z pracy, i to wniosek potwierdzony wynikami analiz przeprowadzonych przez Autora.

3. Ocena tematyki rozprawy

W dobie rozwoju konkurencyjnych rynków energii ograniczane są środki finansowe na rozwój sieci elektroenergetycznych i na jej utrzymanie. Systemy elektroenergetyczne pracują coraz bliżej swoich ograniczeń technicznych, w tym granicy stabilności. Zdolność utrzymania lub poprawy właściwości dynamicznych (w tym stabilności) systemu energetycznego zależy od cech tego systemu, a w tym od struktury, właściwości dynamicznych obiektów składowych oraz ich systemów sterowania i regulacji. Zmiana struktury źródeł energii w systemie elektroenergetycznym w kierunku wzrostu nasycenia OZE niejako potęguje problemy związane ze stabilnością pracy systemu. Elementem wskazywanym jest tu, między innymi zmniejszanie się stałej inercji systemu co bezpośrednio wpływa na jakość regulacji częstotliwości.

Recenzowana rozprawa koncentruje się jednak na pracy systemu elektroenergetycznego w stanach ustalonych (w istocie jest to stan quasi-ustalony). Zasadniczym problemem jest w tym przypadku bilansowanie mocy systemu i bilansowanie energii elektrycznej. Drugie zagadnienie nie stwarza większych problemów ponieważ rozwój OZE jest na tyle szybki, że sumaryczne zdolności

wytwórcze źródeł w systemie rosną, nadążając (często z nadmiarem) za rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną. Natomiast pierwsze zagadnienie, tj. bilansowanie mocy jest dla systemów elektroenergetycznych wyzwaniem. Powodem jest tu ograniczona pewność wytwarzania energii elektrycznej i brak dopasowania generacji mocy przez źródła wiatrowe i fotowoltaiczne do profilu poboru mocy. Rozwiązaniem problemu są tu magazyny energii, i to magazyny wskałi systemowej, tj. o mocach rzędu setek MW i pojemnościach rzędu tysięcy MWh. Magazyny tego typu (nie licząc elektrowni wodnych szczytowo-pompowych) czekają jeszcze na przełom technologiczny.

Można zatem stwierdzić, że mgr inż. Rafał Stanisław Hyrzyński podejmując w rozprawie doktorskiej tematykę współpracy magazynów energii z OZE w pełni wpisuje się w aktualną problematykę pracy systemów elektroenergetycznych i energetycznych. Podjęty przez mgr inż. Rafała Stanisława Hyrzyńskiego temat rozprawy doktorskiej jest nie tylko zagadnieniem aktualnym, ale dla współczesnych i przyszłych systemów elektroenergetycznych ma wręcz charakter krytyczny.

4. Oryginalny dorobek Autora i jego znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki lub techniki

Dla osiągnięcia celu rozprawy i udowodnienia postawionej tezy autor opracował niezbędne metody i narzędzia, wśród których jako indywidualny oryginalny wkład autora można wskazać:

- Przegląd wybranych źródeł i technologii energetyki odnawialnej (rozdział 3) zawierający również opis modeli źródeł energii oraz analizę statystyczną dotyczące ich rozwoju.
- Przegląd wybranych technologii magazynowania energii (rozdział 4) zawierający krytyczną analizę ich właściwości technicznych oraz dane statystyczne.
- Analizę dotyczącą zapotrzebowania na moc i energię w systemie elektroenergetycznym (rozdział 5) zawierającą dane statystyczne dotyczące mocy zainstalowanej oraz produkcji i zużycia energii elektrycznej w zakresie globalnym i lokalnym. Ponadto Autor przedstawił analizę cykliczności dobowej i miesięcznej zużycia energii elektrycznej oraz trendy zmiany zapotrzebowania na energię. Intersująca jest tu również analiza wpływu pandemii COVID-19 na profil zapotrzebowania na energię elektryczną.
- Analizę pracy źródeł trudno prognozowalnych w systemie elektroenergetycznym (rozdział 6) jako element pracy systemu elektroenergetycznego.

Powyższe należy potraktować jako wprowadzenie (utworzenie bazy) do realizacji zasadniczego celu rozprawy (stanowiącego oryginalny dorobek Autora) polegającego na:

- Optymalizacji mocy magazynów energii współpracujących z odnawialnymi źródłami energii w krajowym systemie elektroenergetycznym (rozdział 7).
- Opracowaniu modelu matematycznego magazynu energii mechanicznej współpracującego z magazynem energii termicznej (rozdział 8) i analizie jego pracy.
- Wykonaniu analizy ekonomicznej inwestycji w OZE z magazynem energii (rozdział 9). Analiza ta jest istotnym uzupełnieniem analiz technicznych ponieważ w praktyce (poza wyjątkami) stosowane są rozwiązania techniczne, które z punktu widzenia organizacji (tu OSD, OSP) są opłacalne ekonomicznie.

Autor wykazał się tu bardzo szeroką perspektywą spojrzenia na analizowane zagadnienia, wiążąc ze sobą aspekty prawne, techniczne i ekonomiczne. Podejście takie wyróżnia recenzowaną pracę na tle wielu innych, w których autorzy koncentrują się (czego nie należy jednak traktować jako zarzut) na jednym z wymienionych elementów. Podejście takie jest ponadto niezbędne w przypadku dążenia do rozwiązania użytecznego, a recenzowana praca niewątpliwie charakteru użytecznego ma.

5. Ocena wiedzy Autora, wiedzy na zaawansowanym poziomie, o charakterze podstawowym dla dziedziny nauk technicznych oraz o charakterze szczegółowym, odpowiadającej obszarowi prowadzonych badań naukowych

Ocena wiedzy Autora została już w dużym stopniu dokonana powyżej w niniejszej recenzji. Na wyróżnienie zasługuje:

- Wiedza Autora w zakresie polityk energetyczno-klimatycznych, a w tym dokumentów kreowania polityk przez agendy międzynarodowe i krajowe.
- Zaawansowany, wysoki poziom wiedzy w zakresie analizy i interpretacji zjawisk zachodzących w systemach elektroenergetycznych jak i systemach energetycznych (układ z zasobnikiem energii).
- Wiedza i umiejętność Autora rozprawy w zakresie interpretacji wyników analizy w kontekście ujęcia fizycznego działania złożonego systemu jakim jest system elektroenergetyczny jak i układy zasobnikowe energii.
- Wiedza, doświadczenie i umiejętności w zakresie konstruowania modeli matematycznych i skalowania do realizacji określonych celów naukowych.

Autor wykazał się bardzo wysokim poziomem wiedzy i umiejętności w zakresie pracy systemów elektroenergetycznych i energetycznych, umiejętnością modelowania matematycznego obiektów oraz rozumieniem zjawisk i procesów zachodzących w analizowanych systemach. Niewątpliwie bogate doświadczenie w pracy zawodowej przyczyniły się do bardzo dobrej oceny umiejętności autora związanych z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych.

6. Ocena najnowszych osiągnięć nauki w rozprawie i znajomości Autora współczesnej literatury z przedmiotowej dyscypliny naukowej

Bibliografia obejmuje 695 pozycji, co jest liczbą wyjątkową jak na rozprawy doktorskie. Tak duża liczba pozycji literatury wynika, między innymi z bardzo szerokiego podejścia do analizowanych zagadnień. Z jednej strony są to zagadnienia związane z kreowaniem polityk energetycznych (dokumenty prawne), i dalej: zagadnienia związane z OZE, zagadnienia związane z funkcjonowaniem systemów elektroenergetycznych i w końcu zagadnienia związane z modelowaniem matematycznym obiektów i analizą ich działania. Cytowane pozycje literatury są pozycjami aktualnymi, tj. mającymi bezpośrednie przełożenie na rozwój systemów elektroenergetycznych i energetycznych w kontekście krajowym jak i międzynarodowym.

W spisie literatury znajduje się 17 artykułów opublikowanych w materiałach konferencyjnych i czasopismach (w tym międzynarodowych) oraz opracowań, których autorem lub współautorem jest Autor ocenianej rozprawy.

Dobór i wykorzystanie źródeł literaturowych nie budzą zastrzeżeń, a wskazują na szerokie spojrzenie Autora na problem.

7. Wady i słabe strony rozprawy

Rozdział 2 rozprawy pt. „Energetyka odnawialna jako element polityki energetyczno-klimatycznej” (104 strony) jest doskonałym kompendium wiedzy na temat uwarunkowań i uregulowań prawnych światowych i krajowych związanych z transformacją sektora elektroenergetycznego i energetycznego. Właściwie rozdział ten stanowi samodzielną dogłębną analizę i mógłby (powinien) stanowić samodzielną publikację. Z punktu widzenia dalej prowadzonych w rozprawie działań jest on zbędny, chociaż też można go traktować jako swego rodzaju pozatechniczną otoczkę informacyjną.

8. Uwagi redakcyjne

8.1. Uwagi ogólne

- Redakcja pracy nie budzi zastrzeżeń. Autor od początku do końca pracy konsekwentnie realizuje jej cel i „panuje” na tekstem. Jak na tak obszerny tekst liczba błędów językowych jest skrajnie mała. Recenzent znalazł pojedyncze przypadki błędów literowych, np. „energii5” na str. 12 lub brak litery j w słowie fizycznej – odwołanie 250.
- Nieco przesadną formą charakteryzują się komentarze dotyczące niektórych publikacji jak i osób, np. „monumentalne dzieło [3]” – str. 8 lub „Na kierunek powszechnej elektryfikacji zwrócił uwagę na długo przed tym zanim została ogłoszona.” – str. 52.

8.2. Uwagi szczegółowe

- Nielicznie brakuje odwołań do tabel i rysunków, np. Tabela 4.

- W odwołaniach do rysunków znajdujących się w środku zdania słowo „rys.” powinno być pisane z małej litery, a nie z dużej. Przykład na str. 12.
- Opisy źródeł literaturowych nie zawsze są precyzyjne, np. źródło rysunku 34 – str. 116, czy pozycje [38], [40] – brak kompletnego opisu źródła, pozycja [601] – brak nazwisk autorów.
- Błąd edycyjny we wzorze 3.29.
- Zastosowanie skrótu Wg na początku zdania jest niewłaściwe – str. 132
- Wzór 4.1 powinien znaleźć się wewnątrz tabeli 16.
- Oznaczenia kW_{mocy} i $kWh_{pojemności}$ nie mają uzasadnienia w fizyce. kW są jednostką mocy, a kWh jednostką energii.
- Czy na pewno Autorowi na str. 204 chodziło o zdarzenia o charakterze katastralnym.
- Nie podano środowiska modelowania magazynu energii – Rys. 140.
- Opisy na rys. 141 w języku angielskim, w pracy napisanej w języku polskim nie są właściwe. To samo dotyczy opisów na rys. 152, 153, 154.
- Nieczytelny rys. 157, tj. w zastosowanej skali niewidoczna jest różnica pomiędzy prognozą, a generacją źródeł PV.

Wyżej wymienione uwagi redakcyjne nie zmieniają ogólnej pozytywnej oceny pracy.

9. Wniosek końcowy

W mojej ocenie rozprawa doktorska mgra inż. Rafała Stanisława Hyrzyńskiego, pt. „Modelowanie i optymalizacja magazynów energii, w tym magazynów energii cieplnej, w systemie energetycznym z generacją ze źródeł trudno prognozowalnych” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003, Nr 65, poz. 595 z dnia 16 kwietnia 2003 r. z późn. zmian.; jednolity tekst ustawy Dz. U. z dnia 21 czerwca 2016 r., poz. 882, z późn. zm).

W związku z pozytywną oceną pracy wnoszę o dopuszczenie mgra inż. Rafała Stanisława Hyrzyńskiego do publicznej jej obrony.

