

Warszawa, dn. 26-05-2026 r.

prof. dr hab. inż. Wojciech Bujalski
Instytut Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska
ul. Nowowiejska 21/25
00-665 Warszawa

RECENZJA
rozprawy doktorskiej

Tytuł pracy: Hybrydowy System Zasilania, wykorzystujący metody sztucznej inteligencji, do optymalizacji pracy lokalnego systemu elektroenergetycznego wyposażonego w źródła OZE i magazyny energii

Autor: mgr inż. Bartłomiej Borkowski

Promotor: dr hab. inż. Piotr Szulc, prof. uczelni

Jednostka: Politechnika Wrocławska, Rada Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

1 Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję sporządzono na podstawie zawiadomienia nr 07/02/D08/2026 Prorektora ds. Badań i Innowacji Politechniki Wrocławskiej oraz uchwały nr 375/18/RDND08/2024-2028 Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 18 lutego 2026 r. Recenzja została przygotowana zgodnie z wymaganiami ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w szczególności z art. 187 ust. 1 i 2, określającymi podstawowe kryteria oceny rozprawy doktorskiej.

Ocena obejmuje zatem trzy zasadnicze elementy: prezentację ogólnej wiedzy teoretycznej Kandydata w dyscyplinie, wykazanie umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz ocenę oryginalności rozwiązania problemu naukowego albo oryginalności zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej. W przypadku niniejszej rozprawy szczególne znaczenie ma również jej wdrożeniowy charakter, związany z programem „Doktorat wdrożeniowy II - sztuczna inteligencja”.

2 Zawartość i układ pracy

Rozprawa liczy 112 stron i składa się z ośmiu rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu skrótów oraz bibliografii. Układ pracy jest logiczny: od przedstawienia tła problemu, przez analizę literatury i sformułowanie luki badawczej, po opis algorytmu, modelu matematycznego, symulacji, walidacji na danych rzeczywistych oraz wniosków końcowych.

Rozdział 1 osadza temat rozprawy w aktualnym kontekście transformacji sektora elektroenergetycznego, rozwoju odnawialnych źródeł energii, wzrostu znaczenia prosumentów oraz zmian mechanizmów rozliczeń energii. Autor zasadnie wskazuje, że przejście od net-meteringu do net-

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Wpłynęło dnia 17.06.2026

billingu oraz wprowadzenie rozliczeń opartych na dynamicznej Rynkowej Cenie Energii istotnie zwiększają znaczenie inteligentnego sterowania magazynami energii.

Rozdział 2 zawiera przegląd literatury dotyczący hybrydowych systemów zasilania oraz metod zarządzania energią. Autor porządkuje dostępne podejścia w trzech grupach: metody oparte na regułach, metody deterministyczne oraz metody sztucznej inteligencji. Istotną częścią tego rozdziału są wnioski z przeglądu literatury, w których zidentyfikowano m.in. brak weryfikacji ex-post na danych rzeczywistych, zbyt częste stosowanie uproszczonych taryf zamiast dynamicznych cen rynkowych oraz ograniczanie analiz do krótkich horyzontów czasowych.

Rozdział 3 precyzuje cel, zakres i tezę pracy. Cel pracy został sformułowany jako opracowanie i zbadanie działania zaawansowanego algorytmu harmonogramowania pracy magazynu energii zintegrowanego z odnawialnymi źródłami energii w hybrydowym systemie zasilania.

Rozdział 4 przedstawia autorski algorytm harmonogramowania pracy magazynu energii. Szczególnie istotnym elementem jest zaproponowana funkcja celu, uwzględniająca dynamiczne ceny kupna i sprzedaży energii, bilans energetyczny systemu oraz koszty operacyjne związane z pracą magazynu energii. Autor opisuje także implementację algorytmu genetycznego ze zmodyfikowaną procedurą inicjalizacji populacji, wykorzystującą rozwiązanie uzyskane za pomocą algorytmu sterowania opartego na regułach.

Rozdział 5 zawiera model matematyczny hybrydowego systemu zasilania złożonego z instalacji fotowoltaicznej, turbiny wiatrowej, magazynu elektrochemicznego oraz lokalnego obciążenia. Modele komponentów zostały zaimplementowane w środowisku MATLAB/Simulink.

Rozdział 6 przedstawia symulacje komputerowe prowadzone przy założeniu idealnej prognozy. Analizy wykonano dla różnych pojemności magazynu energii i różnych wartości końcowego stanu jego naładowania. Porównano działanie algorytmu opartego na regułach z działaniem algorytmu genetycznego.

Rozdział 7, najobszerniejszy w rozprawie, obejmuje pełnoroczną walidację algorytmu na danych pomiarowych z rzeczywistego obiektu zlokalizowanego w Kaźmierzu koło Poznania. Badana instalacja obejmuje system fotowoltaiczny o mocy około 17 kWp, turbiny wiatrowe o mocy 4 kW oraz magazyn energii o pojemności 50 kWh. W rozdziale tym analizowane są modele predykcyjne wykorzystujące sieci neuronowe oraz trzy scenariusze sterowania: system bez magazynu energii, system z magazynem sterowanym algorytmem opartym na regułach oraz system z magazynem sterowanym autorskim algorytmem optymalizacyjnym opartym na algorytmie genetycznym.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie, wnioski końcowe oraz wskazanie znaczenia zaproponowanego algorytmu dla dalszego rozwoju systemów zarządzania energią w układach z magazynami energii i źródłami OZE.

3 Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej Kandydata w dyscyplinie

Wiedza teoretyczna Kandydata ujawnia się na kilku płaszczyznach, które pozostają ściśle związane z energetyką rozproszoną, odnawialnymi źródłami energii, magazynowaniem energii oraz zarządzaniem pracą lokalnych systemów elektroenergetycznych.

W zakresie energetyki i systemów elektroenergetycznych Autor wykazuje znajomość architektury hybrydowych systemów zasilania, zasad współpracy źródeł OZE z siecią dystrybucyjną, problematyki lokalnych bilansów energii oraz uwarunkowań technicznych punktu przyłączenia prosumenta. Zagadnienia te są osadzone w aktualnym kontekście transformacji energetycznej, rozwoju generacji rozproszonej i rosnącej potrzeby elastyczności systemu elektroenergetycznego.

W zakresie technologii odnawialnych źródeł energii Kandydat prezentuje podstawy teoretyczne dotyczące systemów fotowoltaicznych, w tym modelu jednodiodowego ogniwa, charakterystyk prądowo-napięciowych i mocy oraz algorytmów śledzenia punktu mocy maksymalnej. Omawia także modelowanie turbiny wiatrowej oraz generatora synchronicznego z magnesami trwałymi. Modele te są przedstawione w sposób wystarczający dla realizacji celu pracy i tworzą spójną podstawę do dalszych analiz symulacyjnych.

W zakresie magazynowania energii elektrycznej Autor wykazuje znajomość właściwości bateryjnych systemów magazynowania energii, ograniczeń pracy magazynu, znaczenia stanu naładowania oraz problematyki degradacji. Uwzględnienie kosztów pracy magazynu w funkcji celu świadczy o tym, że Kandydat rozumie, iż maksymalizacja bieżącego efektu ekonomicznego nie może być rozpatrywana w oderwaniu od trwałości magazynu i kosztów jego eksploatacji.

W zakresie metod optymalizacji i sztucznej inteligencji Autor wykazuje znajomość wybranych metod zarządzania energią, w tym algorytmów opartych na regułach, metod deterministycznych, algorytmów genetycznych oraz sieci neuronowych LSTM. Szczególnie istotne jest połączenie prognozowania generacji ze źródeł OZE z optymalizacją harmonogramu pracy magazynu energii w horyzoncie dnia następnego (day-ahead).

W zakresie rynku energii i regulacji prawno-ekonomicznych Kandydat wykazuje znajomość mechanizmów rozliczeń prosumenckich, dynamicznych cen energii oraz znaczenia zmienności cen dla pracy magazynu energii. Jest to ważne, ponieważ przedmiot rozprawy ma charakter interdyscyplinarny: łączy modelowanie techniczne, optymalizację matematyczną i ocenę ekonomiczną pracy lokalnego systemu elektroenergetycznego.

Na tej podstawie stwierdzam, że rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka na poziomie odpowiadającym wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim. Ten element oceniam pozytywnie.

4 Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej obejmuje w szczególności zdolność do identyfikacji problemu badawczego, krytycznej analizy literatury, sformułowania celu i tezy pracy, doboru odpowiednich metod badawczych, przeprowadzenia badań oraz interpretacji i krytycznej dyskusji uzyskanych wyników.

4.1 Identyfikacja problemu i sformułowanie tezy

Autor prawidłowo zidentyfikował problem badawczy na styku trzech obszarów: zarządzania pracą magazynu energii, wykorzystania dynamicznych cen energii w lokalnych systemach prosumenckich oraz weryfikacji algorytmów optymalizacyjnych na danych pochodzących z rzeczywistego obiektu. Rozpoznana luka badawcza została sformułowana przekonująco i wynika bezpośrednio z przeglądu literatury. Teza pracy jest mierzalna i możliwa do weryfikacji za pomocą zaproponowanego aparatu badawczego.

4.2 Metodologia i realizacja badań

Kandydat opracował model matematyczny hybrydowego systemu zasilania, zaproponował funkcję celu dla algorytmu optymalizacji, zaimplementował procedurę harmonogramowania pracy magazynu energii oraz przeprowadził wieloetapowe analizy symulacyjne. Na pozytywną ocenę zasługuje przyjęcie struktury badań obejmującej zarówno etap z idealną prognozą, jak i etap walidacji z wykorzystaniem danych rzeczywistych oraz prognoz generacji OZE.

Istotnym elementem samodzielności badawczej jest zaproponowanie rozwiązania, w którym wynik algorytmu opartego na regułach służy jako deterministyczny warunek startowy dla algorytmu genetycznego. Takie podejście porządkuje proces poszukiwania rozwiązania i ogranicza wpływ początkowej losowości populacji, charakterystycznej dla klasycznych implementacji algorytmów genetycznych.

4.3 Interpretacja wyników i wnioskowanie

Kolejnym elementem świadczącym o dojrzałości badawczej Kandydata jest umiejętność oceny uzyskanych wyników oraz formułowania na ich podstawie prawidłowych wniosków. Przykładem takiego podejścia jest analiza przedstawiona w rozdziale 7.5, w której Autor nie ogranicza się do prezentacji rezultatów obliczeń, lecz podejmuje ich interpretację, wskazuje możliwe przyczyny obserwowanych zależności oraz odnosi wyniki do przyjętych założeń i uwarunkowań analizowanego problemu. Dowodem na zdolność analizy wyników jest odróżnienie efektów wynikających z działania algorytmu sterowania od efektów będących konsekwencją błędów prognozy meteorologicznej.

W rozprawie widoczne jest również zrozumienie różnicy między prostą maksymalizacją autokonsumpcji a strategią ukierunkowaną na efekt ekonomiczny w warunkach dynamicznych cen energii. Autor poprawnie interpretuje sytuacje, w których niższy wskaźnik autokonsumpcji może prowadzić do lepszego wyniku finansowego, jeżeli magazyn energii jest wykorzystywany do arbitrażu cenowego.

Całość przeprowadzonych badań potwierdza, że Kandydat posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, obejmującą zarówno przygotowanie modelu, implementację metody, przeprowadzenie obliczeń, jak i interpretację wyników. Ten element oceniam pozytywnie.

5 Ocena oryginalności rozwiązania

Zgodnie z art. 187 ust. 2 ustawy przedmiotem rozprawy doktorskiej powinno być oryginalne rozwiązanie problemu naukowego albo oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej. W ocenianej rozprawie element oryginalności występuje zarówno w aspekcie naukowym, jak i aplikacyjnym.

5.1 Oryginalność naukowa

Za najważniejsze elementy oryginalnego wkładu naukowego Kandydata uznaję:

- opracowanie funkcji celu integrującej w jednym sformułowaniu optymalizacyjnym dynamiczne ceny kupna i sprzedaży energii, bilans energetyczny hybrydowego systemu zasilania oraz koszty pracy magazynu energii;
- zaprojektowanie zmodyfikowanej procedury inicjalizacji populacji algorytmu genetycznego z wykorzystaniem rozwiązania uzyskanego za pomocą algorytmu opartego na regułach;
- opracowanie algorytmu pozwalającego na wykonanie obliczeń pełnorocznych z 15-minutową rozdzielczością czasową, co pozwala uchwycić zarówno krótkookresową zmienność cen i generacji, jak i sezonowość pracy źródeł OZE;
- weryfikację działania algorytmu z wykorzystaniem danych z rzeczywistego obiektu, z uwzględnieniem wpływu błędów prognozowania generacji OZE na wynik ekonomiczny.

Oryginalność rozwiązania polega zatem nie tylko na zastosowaniu znanych narzędzi, takich jak algorytm genetyczny czy sieci neuronowe, lecz przede wszystkim na ich celowym połączeniu w procedurę odpowiadającą specyfice lokalnego hybrydowego systemu zasilania działającego w warunkach dynamicznych rozliczeń energii.

5.2 Oryginalność aplikacyjna

Rozprawa ma wyraźny wymiar aplikacyjny. Opracowany algorytm został zaprojektowany dla warunków odpowiadających aktualnym mechanizmom rozliczeń prosumenckich w Polsce, w których znaczenie ma nie tylko ilość energii zużywanej na potrzeby własne, lecz także czas jej poboru, magazynowania i sprzedaży. Wykazany efekt ekonomiczny względem systemu bez magazynu oraz względem prostego algorytmu bilansowania potwierdza potencjał wdrożeniowy rozwiązania dla prosumentów, operatorów mikrosieci oraz podmiotów eksploatujących lokalne układy OZE z magazynami energii.

Na tej podstawie stwierdzam, że rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej.

6 Uwagi krytyczne i dyskusyjne

6.1 Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Rozprawę oceniam pozytywnie, jednak dla pełnej i rzetelnej oceny należy wskazać kilka zagadnień, które mają charakter krytyczno-dyskusyjny. Nie podważają one wartości pracy ani zasadności końcowej oceny pozytywnej, lecz wskazują na ograniczenia przyjętego podejścia oraz możliwe kierunki dalszych badań.

1. Teza pracy brzmi: „Wykorzystanie zaawansowanych algorytmów opartych na metodach sztucznej inteligencji do harmonogramowania pracy magazynu energii...”, natomiast jako cel pracy wskazano „opracowanie i zbadanie zaawansowanego algorytmu harmonogramowania pracy magazynu energii”. Zakres pracy obejmuje z kolei „opracowanie autorskiej metodyki sterowania magazynem energii opartej na sztucznej inteligencji, integrującej moduł predykcyjny z algorytmem optymalizacji harmonogramu”. Należy zauważyć, że algorytmy genetyczne są metodą dobrze opisaną w literaturze już od lat 70., a sieci neuronowe stanowią obecnie standardowe narzędzie stosowane w wielu obszarach analizy i optymalizacji. Gdyby zatem Autor ograniczył się wyłącznie do zastosowania gotowych metod, trudno byłoby mówić o opracowaniu algorytmu, co mogłoby budzić wątpliwości w zakresie oryginalności pracy. Jednocześnie należy podkreślić, że Autor nie deklaruje opracowania algorytmów genetycznych od podstaw. Oryginalność pracy polega raczej na stworzeniu autorskiego systemu sterowania, obejmującego: własną funkcję celu, przedstawioną w równaniu 4.1; zmodyfikowaną procedurę inicjalizacji populacji algorytmu genetycznego z wykorzystaniem algorytmów regułowych; a także integrację modułu predykcyjnego z optymalizatorem na potrzeby sterowania układem. W konsekwencji oryginalność rozprawy nie polega na zaproponowaniu nowej metody optymalizacyjnej sensu stricto, lecz na autorskim zaprojektowaniu architektury systemu sterowania, funkcji celu oraz zmodyfikowanej procedury inicjalizacji. Elementy te, rozpatrywane łącznie, można uznać za oryginalne rozwiązanie w rozumieniu art. 187 ustawy. Zakres walidacji na obiekcie rzeczywistym.
2. Istotną zaletą pracy jest wykorzystanie danych pomiarowych z rzeczywistej instalacji, jednak walidacja została przeprowadzona dla jednego obiektu, o określonej konfiguracji technicznej i profilu zapotrzebowania. Ogranicza to możliwość bezpośredniego uogólnienia wyników na inne typy odbiorców, inne relacje mocy źródeł OZE do pojemności magazynu, odmienne profile zużycia energii oraz inne warunki pracy sieci. W przyszłych badaniach warto byłoby zweryfikować algorytm na kilku obiektach o zróżnicowanej strukturze odbioru i generacji.

3. Zakres twierdzenia o uniwersalności algorytmu. W rozprawie wskazano możliwość wykorzystania opracowanego algorytmu także dla innych typów magazynów energii. Jest to kierunek interesujący i potencjalnie wartościowy, jednak w pracy empirycznie zweryfikowano jeden przypadek magazynu energii elektrycznej. Wniosek o uniwersalności rozwiązania należy więc traktować jako dobrze uzasadnioną hipotezę rozwojową, a nie jako w pełni potwierdzony wynik badań. Praca zyskałaby na wartości, gdyby przynajmniej przedstawiono szerszą dyskusję ograniczeń zastosowanej metodologii.
4. Wrażliwość wyników ekonomicznych na założenia kosztowe. Autor uwzględnił koszty pracy magazynu energii, co należy ocenić pozytywnie. Jednocześnie końcowy efekt ekonomiczny jest silnie zależny od przyjętych założeń dotyczących kosztu zakupu magazynu, liczby cykli, sprawności, modelu degradacji, różnicy między ceną zakupu i sprzedaży energii oraz zasad rozliczeń. W pracy można byłoby szerzej przedstawić analizę wrażliwości wyniku finansowego na te parametry, zwłaszcza że mają one bezpośrednie znaczenie dla oceny opłacalności wdrożenia.
5. Wpływ jakości prognoz na wynik optymalizacji. Autor słusznie pokazuje, że błędy prognozy generacji OZE przekładają się na wynik finansowy systemu. Zagadnienie to mogłoby jednak zostać jeszcze mocniej wyeksponowane, ponieważ w praktycznej eksploatacji jakość prognoz jest jednym z kluczowych warunków skuteczności harmonogramowania pracy magazynu. Warto byłoby szerzej omówić, jak algorytm zachowywałby się przy innych poziomach błędów prognoz, przy błędach systematycznych oraz przy nagłych zmianach warunków meteorologicznych. Warto byłoby przynajmniej oszacować, jak różne poziomy błędów prognozy przekładają się na uzyskane wyniki ekonomiczne.
6. Zakres porównania z metodami referencyjnymi. Podstawowym układem odniesienia w pracy jest sterowanie oparte na regułach, co jest uzasadnione, ponieważ jest to rozwiązanie proste i często stosowane w praktyce. Z punktu widzenia oceny naukowej interesujące byłoby jednak szersze porównanie z innymi metodami optymalizacji, np. programowaniem liniowym lub mieszanym całkowitoliczbowym, programowaniem dynamicznym. Pozwoliłoby to określić, czy przewaga zaproponowanego algorytmu wynika z samej funkcji celu, ze zmodyfikowanej inicjalizacji, czy z doboru konkretnej metody optymalizacji. Należy jednak podkreślić, że takie rozszerzenie znacząco zwiększyłoby zakres i nakład pracy badawczej..
7. Praktyczna implementacja w systemie rzeczywistym. Rozprawa ma charakter wdrożeniowy, dlatego szczególnie istotne są wymagania praktyczne: dostępność danych wejściowych, komunikacja z falownikami i systemem BMS, niezawodność transmisji danych, reakcja na brak danych, ograniczenia gwarancyjne magazynu oraz procedury bezpieczeństwa. Elementy te są częściowo poza głównym zakresem rozprawy, ale ich szersze omówienie wzmocniłoby aplikacyjny wymiar pracy.
8. W kilku miejscach rozprawy Autor przywołuje nazwy funkcji środowiska MATLAB bez wystarczającego wyjaśnienia ich działania, np. na s. 38: „Natomiast trzecia podgrupa stanowiąca ~80% populacji generowana jest w sposób losowy z rozkładem jednostajnym (funkcja rand z Matlaba)”. W pracy naukowej właściwe byłoby przede wszystkim wyjaśnienie zastosowanej procedury obliczeniowej, natomiast nazwa konkretnej funkcji programistycznej powinna pełnić jedynie rolę informacji uzupełniającej.

6.2 Pytania do Doktoranta

W związku z przedstawionymi uwagami chciałbym zwrócić się do Doktoranta z następującymi pytaniami:

1. Które parametry ekonomiczne i techniczne magazynu energii mają największy wpływ na końcowy wynik finansowy systemu: koszt zakupu, liczba cykli, sprawność, pojemność, moc czy przyjęty model degradacji?
2. Jakie modyfikacje algorytmu byłyby konieczne, aby zastosować go do magazynów energii innych niż baterijny magazyn elektrochemiczny, np. do magazynu ciepła lub magazynu wodorowego?
3. W jaki sposób był zbudowany dobowy profil odbiorcy na podstawie ENEA Operator sp. z o.o. IRiESD

Uwagi krytyczne i pytania dyskusyjne nie obniżają pozytywnej oceny rozprawy. Wskazują natomiast na naturalne kierunki dalszego rozwoju badań oraz na zagadnienia istotne dla praktycznego wdrożenia opracowanego algorytmu.

7 Konkluzja

Po przeprowadzeniu oceny rozprawy doktorskiej mgr. inż. Bartłomieja Borkowskiego pt. „Hybrydowy System Zasilania, wykorzystujący metody sztucznej inteligencji, do optymalizacji pracy lokalnego systemu elektroenergetycznego wyposażonego w źródła OZE i magazyny energii” stwierdzam, że rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2022 r. poz 574 z późn. zm.).

Rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, wykazuje jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a zarazem oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej.

W związku z powyższym pozytywnie oceniam rozprawę doktorską mgr. inż. Bartłomieja Borkowskiego i wnioskuję o jej przyjęcie oraz dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

prof. dr hab. inż. Wojciech Bujalski
Politechnika Warszawska