

Kraków, dn. 27 kwietnia 2026 r.

dr hab. inż. Tomasz Sobota, prof. PK
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Procesów Ciepłych, Ochrony Powietrza
i Utylizacji Odpadów
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków
e-mail: tomasz.sobota@pk.edu.pl

Recenzja 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*

1. Podstawa opracowania

Podstawą formalną do wykonania niniejszej recenzji jest Uchwała nr 375/18/RDND08/5/2024-2028 z dnia 18 lutego 2026 roku Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej, o czym poinformował Zastępca Przewodniczącego Rady prof. dr hab. inż. Bartosz Zajączkowski w piśmie RDND08/23/2026 z dnia 23 lutego 2026 r.

2. Przedmiot i ocena tematu

Przedmiot recenzji stanowi rozprawa doktorska 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*, której promotorem dr hab. inż. Piotr Szulc, profesor uczelni. Praca zrealizowana została w ramach programu *Doktorat wdrożeniowy II – sztuczna inteligencja, edycja V*, na podstawie umowy DWD/5/0311/2021 pomiędzy Ministerstwem Edukacji i Nauki a Politechniką Wrocławską.

Światowa elektroenergetyka weszła w fazę szybkiej transformacji energetycznej. Międzynarodowa Agencja Energetyczna (IEA) szacuje, że globalne zużycie energii elektrycznej wzrosło w 2024 r. o 4,3%, a w kolejnych latach ma nadal rosnać bardzo szybko. Równocześnie rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE) ma skalę bezprecedensową: według IEA globalna moc odnawialna ma się do 2030 r. podwoić, a fotowoltaika ma dać niemal 80% tego przyrostu. Według Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej (IRENA) już w 2024 r. na świecie przybyło rekordowe 582 GW nowych mocy odnawialnych, a do końca 2025 r. instalacje energetyczne wykorzystujące odnawialne źródła energii stanowiły 49,4% globalnej mocy zainstalowanej; dodatkowo 91% nowych projektów OZE uruchomionych w 2024 r. było tańszych niż nowe alternatywy oparte na paliwach kopalnych.

Ten rozwój rodzi nowy problem systemowy, w którym nie chodzi już tylko o budowę nowych źródeł energii, lecz o ich skuteczną integrację z siecią. IEA wprost wskazuje, że wraz z szybkim wzrostem fotowoltaiki i energetyki wiatrowej rośnie skala curtailmentu, czyli wymuszonego ograniczania generacji, a jego redukcja wymaga rozbudowy sieci, zwiększenia elastyczności i magazynowania. Z kolei Agencja ds. Współpracy Organów Regulacji Energetyki (ACER) pokazuje, że w Europie nasiliły się zjawiska bardzo niskich i ujemnych cen energii, a na 70%

dni w 2024 r. wahania cen w ciągu doby sięgały co najmniej 50 EUR/MWh; podczas epizodów niskiej generacji OZE ceny potrafiły rosnać skrajnie wysoko. To oznacza, że magazyny energii i algorytmy ich sterowania stają się elementami infrastruktury systemowej, a nie jedynie dodatkami technologicznymi.

Polska wchodzi w tę transformację z trudniejszego punktu startu niż wiele państw Europy Zachodniej. Eurostat podkreśla, że jeszcze w 2023 r. 39% energii elektrycznej w Polsce pochodziło z węgla kamiennego, a 21% z węgla brunatnego. Jednocześnie w 2024 r. Polska odpowiadała za 97% wydobycia węgla kamiennego w UE i 43% jego zużycia. Oznacza to, że krajowa transformacja jest nie tylko kwestią przyrostu nowych mocy ze źródeł odnawialnych, ale głęboką przebudową struktury wytwarzania, bezpieczeństwa dostaw i pracy systemu. Ponadto w Polsce nastąpił bardzo szybki rozwój źródeł rozproszonych. Urząd Regulacji Energetyki (URE) podał, że na koniec 2025 r. działało już ponad 1,6 mln mikroinstalacji OZE o łącznej mocy niemal 13,9 GW. Równolegle Polskie Sieci Elektroenergetyczne (PSE) zaznaczają, że rozwój sieci do 2034 r. ma umożliwić wyprowadzenie mocy z około 45 GW instalacji fotowoltaicznych, ponad 19 GW lądowej energetyki wiatrowej i około 18 GW morskich farm wiatrowych, co wiąże się z nakładami przekraczającymi 64 mld zł. Sam operator systemu przesyłowego podkreśla też potrzebę uwzględniania potencjału elastyczności w kolejnych planach rozwoju. Innymi słowy: skala nowych mocy rośnie tak szybko, że bez lokalnego bilansowania, magazynów i inteligentnego sterowania rośnie ryzyko przeciążeń, ograniczeń generacji i pogorszenia ekonomiki inwestycji.

Zmianie ulega logika ekonomiczna funkcjonowania prosumenta i małych systemów wykorzystujących źródła odnawialne. W Polsce net-billing opiera rozliczenie nadwyżek na wartości rynkowej energii, a Ministerstwo Klimatu i Środowiska wprost wskazuje, że przy rozliczeniach według godzinowej ceny energii rynkowej trzeba planować sprzedaż energii w godzinach najwyższych cen i zakupy wtedy, gdy ceny są najniższe. Ten sam resort podkreśla, że właściwe zarządzanie magazynem energii ma kluczowe znaczenie dla efektywności instalacji, a oddawanie energii do sieci w godzinach nadprodukcji może prowadzić do przeciążeń i wyłączeń instalacji fotowoltaicznych. Nie jest to problem teoretyczny, ponieważ URE dokumentuje powtarzające się epizody cen ujemnych na Towarowej Giełdzie Energii (TGE), w tym 33 godziny ujemnych cen tylko w czerwcu 2025 r.

Na tym tle tematyka podjęta w ocenianej dysertacji jawi się jako w pełni aktualna i istotna. Współczesna energetyka potrzebuje bowiem nie tylko nowych źródeł wytwórczych, lecz także narzędzi umożliwiających koordynację prognozy pogody, zmiennej generacji OZE, pracy magazynów energii, lokalnego zapotrzebowania oraz sygnałów cenowych. Rozprawa poświęcona optymalizacji harmonogramu pracy magazynu energii w hybrydowym systemie zasilania odpowiada zatem na realny, aktualny i narastający problem systemowy – zarówno w skali światowej, jak i w realiach polskiej transformacji energetycznej.

3. Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska liczy 112 stron. Ma 8 głównych rozdziałów, a także streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis literatury.

Rozdział pierwszy ma charakter wprowadzający i problemowy. Autor przedstawił w nim szerokie tło podejmowanej problematyki badawczej, odnosząc się do współczesnych uwarunkowań transformacji energetycznej, wzrostu znaczenia odnawialnych źródeł energii, rosnącej roli magazynów energii oraz zmian zachodzących na rynku energii elektrycznej. Szczególną uwagę poświęcono uwarunkowaniom technicznym i ekonomicznym funkcjonowania źródeł OZE oraz potrzebie stosowania zaawansowanych metod zarządzania energią w lokalnych systemach elektroenergetycznych.

Rozdział drugi zawiera analizę dotychczasowego stanu wiedzy w zakresie hybrydowych systemów zasilania oraz metod zarządzania energią. Autor omówił zarówno architekturę systemów hybrydowych, jak i podstawowe grupy metod sterowania i optymalizacji, w tym metody regulowe, deterministyczne oraz metody wykorzystujące sztuczną inteligencję. Rozdział kończy się trafnym wskazaniem luk badawczych, które uzasadniają podjęcie własnych badań, w szczególności w odniesieniu do dynamicznych cen energii, pełnorocznego horyzontu analiz oraz potrzeby walidacji proponowanych rozwiązań z wykorzystaniem danych rzeczywistych. W sporządzonym przeglądzie literatury wykorzystano siedemdziesiąt trzy pozycje literaturowe.

Rozdział trzeci, *Cel, zakres i teza pracy*, porządkuje założenia badawcze rozprawy. Autor sformułował w nim cel pracy, określił jej zakres oraz przedstawił tezę badawczą. Z rozdziału tego jasno wynika, że zasadniczym zamierzeniem rozprawy jest opracowanie i zbadanie działania zaawansowanego algorytmu harmonogramowania pracy magazynu energii współpracującego z odnawialnymi źródłami energii w Hybrydowym Systemie Zasilania, przy jednoczesnym sprawdzeniu wpływu takiego rozwiązania na wskaźniki ekonomiczne pracy systemu.

Rozdział czwarty, pt. *Autorski algorytm harmonogramowania pracy magazynu energii zintegrowany z hybrydowym systemem zasilania* stanowi zasadniczy rdzeń koncepcyjny rozprawy. Autor przedstawił w nim opracowany przez siebie algorytm sterowania, opisał funkcję celu, przyjęte ograniczenia techniczne oraz sposób uwzględnienia kosztów degradacji magazynu energii. Szczególnie istotnym elementem tego rozdziału jest prezentacja implementacji algorytmu genetycznego oraz wykorzystania sieci *Long Short-Term Memory* (LSTM) do prognozowania generacji energii z OZE. Rozdział ten należy uznać za kluczowy z punktu widzenia autorskiego wkładu Doktoranta.

Rozdział piąty ma charakter modelowy i techniczny. Autor opisał w nim strukturę oraz model matematyczny analizowanego układu, obejmującego instalację fotowoltaiczną, turbinę wiatrową, magazyn energii, model obciążenia lokalnego oraz współpracę systemu z siecią elektroenergetyczną. Rozdział ten tworzy niezbędną podstawę dla dalszych badań symulacyjnych i potwierdza poprawne przygotowanie zaplecza modelowego do weryfikacji opracowanego algorytmu.

Rozdział szósty poświęcony został badaniom symulacyjnym przeprowadzonym dla modelu teoretycznego. Autor porównał w nim działanie systemu sterowanego algorytmem regulowym oraz autorskim algorytmem genetycznym, analizując efektywność ekonomiczną obu podejść, mechanizm arbitrażu cenowego oraz wpływ wybranych parametrów technicznych, takich jak pojemność magazynu energii czy końcowy stan naładowania. Rozdział ten stanowi ważny etap weryfikacji skuteczności proponowanego rozwiązania.

Rozdział siódmy, *Symulacja pracy hybrydowego systemu zasilania typu słoneczno-wiatrowego z magazynem energii z wykorzystaniem rzeczywistych danych pomiarowych*, ma szczególnie istotne znaczenie aplikacyjne i walidacyjne. Autor wykorzystał w nim rzeczywiste dane pomiarowe pochodzące z obiektu referencyjnego, a następnie przeprowadził analizę trzech scenariuszy pracy systemu: bez magazynu energii, z magazynem sterowanym algorytmem regulowym oraz z magazynem sterowanym autorskim algorytmem optymalizacji. W rozdziale zaprezentowano także wyniki prognozowania generacji energii z OZE z zastosowaniem sieci LSTM oraz przeprowadzono analizę porównawczą i ocenę stabilności czasowej zaproponowanego rozwiązania.

Rozdział ósmy zamyka rozprawę syntetycznym ujęciem najważniejszych rezultatów przeprowadzonych badań. Autor podsumował w nim osiągnięte wyniki, wskazał najważniejsze wnioski płynące z analiz symulacyjnych i walidacyjnych oraz potwierdził zasadność

zastosowania metod sztucznej inteligencji w harmonogramowaniu pracy magazynu energii w hybrydowym systemie zasilania. Rozdział ten stanowi logiczne domknięcie całej rozprawy i porządkuje jej najważniejsze osiągnięcia naukowe oraz aplikacyjne.

W rozprawie sformułowano jeden główny cel badawczy oraz jedną wyraźnie postawioną tezę. Celem pracy było

opracowanie i zbadanie działania zaawansowanego algorytmu harmonogramowania pracy magazynu energii zintegrowanego z odnawialnymi źródłami energii w Hybrydowym Systemie Zasilania,

przy czym zadaniem tego algorytmu miała być optymalizacja przepływu energii zarówno wewnątrz lokalnej sieci elektroenergetycznej, jak i pomiędzy układem a siecią zewnętrzną.

Teza pracy została sformułowana jednoznacznie:

wykorzystanie zaawansowanych algorytmów opartych na metodach sztucznej inteligencji do harmonogramowania pracy magazynu energii w hybrydowym systemie zasilania typu on-grid prowadzi do istotnej poprawy wskaźników ekonomicznych pracy systemu, pod warunkiem zastosowania magazynu energii o odpowiedniej pojemności.

Tak sformułowany cel miał charakter nie tylko projektowy, ale również weryfikacyjny. Istotą pracy nie było bowiem wyłącznie zaproponowanie nowego algorytmu sterowania, lecz wykazanie, że rozwiązanie to ma przewagę nad sterowaniem klasycznym, zwłaszcza w warunkach dynamicznych cen energii, zmiennej generacji z OZE oraz ograniczeń technicznych magazynu energii. Innymi słowy, doktorant powinien był wykazać, że autorska metoda nie tylko działa poprawnie od strony obliczeniowej, ale również przynosi wymierny efekt ekonomiczny, a ponadto zachowuje skuteczność po przejściu od warunków modelowych do danych rzeczywistych. Taki sens celu pracy wynika zarówno z rozdziału trzeciego, jak i ze streszczenia oraz końcowej syntezy wyników.

Osiągnięcie założonego celu wymagało przede wszystkim zbudowania kompletnego zaplecza modelowego i obliczeniowego. Autor musiał opracować model matematyczny Hybrydowego Systemu Zasilania obejmujący instalację fotowoltaiczną, turbinę wiatrową, magazyn energii, profil obciążenia oraz współpracę z siecią elektroenergetyczną. Równolegle konieczne było sformułowanie funkcji celu i zestawu ograniczeń technicznych dla magazynu energii, tak aby algorytm optymalizacji uwzględniał nie tylko przychody i koszty zakupu energii, lecz także sprawności ładowania i rozładowania, dopuszczalny zakres stanu naładowania magazynu energii, warunek końcowego stanu naładowania oraz koszt degradacji magazynu. Bez takiego formalnego opisu problemu nie byłoby możliwe przejście od ogólnej idei inteligentnego sterowania do rozwiązania, które można obliczyć, porównać i zweryfikować.

Drugim warunkiem realizacji celu było opracowanie autorskiej metodyki sterowania, łączącej moduł predykcyjny z modułem optymalizacji. W pracy wykorzystano podejście hybrydowe: do prognozowania generacji z OZE zastosowano sieci neuronowe LSTM, natomiast do optymalizacji harmonogramu pracy magazynu wykorzystano algorytm genetyczny ze zmodyfikowaną procedurą inicjalizacji populacji, wykorzystującą rozwiązanie uzyskane z algorytmu regułowego. Autor wskazuje, że takie rozwiązanie miało ograniczyć negatywny wpływ losowej inicjalizacji i przyspieszyć osiąganie zbieżności w dobowym horyzoncie planowania. Osiągnięcie celu pracy wymagało zatem nie tylko użycia gotowych narzędzi, lecz także ich twórczej integracji i modyfikacji.

W sensie metodycznym rozprawa opiera się na kilku komplementarnych metodach badawczych. Pierwszą z nich jest analiza literatury przedmiotu, która posłużyła do identyfikacji stanu wiedzy, rozpoznania luk badawczych oraz uzasadnienia wyboru problemu. Autor wskazał, że niedostatecznie rozpoznane pozostają zwłaszcza zagadnienia optymalizacji lokalnych mikrosieci prosumenckich, pełnorocznej weryfikacji algorytmów, wykorzystania

rzeczywistych dynamicznych cen energii oraz walidacji ex post z użyciem danych rzeczywistych. Już na tym etapie widać, że postawiona teza została osadzona w jasno zdefiniowanej luce badawczej.

Drugą grupę metod stanowią metody modelowania i symulacji numerycznej. Autor opracował modele komponentów systemu w środowisku MATLAB/Simulink i Simscape Electrical, a następnie wykorzystał je do przeprowadzenia obliczeń dla pełnorocznego horyzontu czasowego, z krokiem 15-minutowym i dobowym oknem optymalizacji. W tym sensie rozprawa ma silny komponent inżynierski: teza nie była weryfikowana opisowo, lecz poprzez budowę modelu technicznego, sformułowanie zadania optymalizacyjnego i przeprowadzenie szeregu symulacji porównawczych. Trzecią grupę metod tworzą metody sztucznej inteligencji i optymalizacji. W części predykcyjnej wykorzystano sieci LSTM do prognozowania generacji energii z OZE na podstawie danych meteorologicznych, natomiast w części decyzyjnej zastosowano algorytm genetyczny do wyznaczania optymalnego harmonogramu pracy magazynu energii. Rozwiązanie to zostało dodatkowo wspomagane algorytmem gradientowym uruchamianym po zakończeniu algorytmu genetycznego oraz referencyjnym algorytmem regulowym, użytym zarówno jako punkt odniesienia, jak i element inicjalizacji populacji. Metodologicznie mamy więc do czynienia z układem: predykcja – optymalizacja – porównanie – walidacja. Czwartą grupę metod stanowiły analiza porównawcza oraz analiza wrażliwości. Autor nie ograniczył się do jednego przebiegu symulacyjnego, lecz badał wpływ kluczowych parametrów na wynik końcowy. W części modelowej analizowano zależność efektu ekonomicznego od pojemności magazynu i od wymaganego stanu naładowania na koniec dnia, co miało bezpośredni związek z tezą o konieczności *odpowiedniej pojemności* magazynu. Z kolei w części walidacyjnej porównano wyniki dla różnych strategii sterowania i zestawiono efekty ekonomiczne, energetyczne oraz eksploatacyjne. Taka konstrukcja badań jest właściwa dla pracy, która ma dowodzić przewagi jednego rozwiązania nad innym.

Jeśli chodzi o przypadki analizowane w pracy, można wyróżnić dwa główne poziomy badawcze. Pierwszy poziom dotyczył modelu teoretycznego hybrydowego systemu solarno-wiatrowego z magazynem energii. Na tym etapie badania przeprowadzono dla pełnego roku kalendarzowego 2025, przy założeniu 15-minutowej rozdzielczości danych i dobowego horyzontu optymalizacji. Porównano dwa sposoby sterowania: algorytm regulowy oraz autorski algorytm genetyczny. W tej części rozpatrywano magazyny o pojemności 5, 10 i 15 kWh oraz różne wartości końcowego stanu naładowania magazynu energii, co pozwoliło ocenić, kiedy algorytm zaawansowany rzeczywiście uzyskuje przewagę nad rozwiązaniem klasycznym.

Wyniki tej części badań mają istotne znaczenie dla oceny tezy. Autor wykazał, że sama implementacja algorytmu inteligentnego nie gwarantuje poprawy efektów ekonomicznych w każdych warunkach. Dla małych pojemności magazynu przewaga algorytmu genetycznego nad algorytmem regulowym nie była oczywista, natomiast wyraźnie ujawniała się przy większej pojemności, szczególnie dla magazynu 15 kWh i odpowiednio dobranego końcowego stanu naładowania. Oznacza to, że teza została sformułowana ostrożnie i trafnie: *poprawa ekonomiczna zależy nie tylko od „inteligencji” algorytmu, ale także od przestrzeni decyzyjnej stworzonej przez pojemność magazynu*.

Drugi poziom badawczy stanowiła walidacja na danych rzeczywistych, co należy uznać za szczególnie mocny punkt pracy. Autor analizował rzeczywisty obiekt w Kaźmierzu koło Poznania, obejmujący instalacje fotowoltaiczne o łącznej mocy około 17 kWp, turbiny wiatrowe o mocy 4 kW oraz lokalne odbiory o rocznym zapotrzebowaniu około 18 000 kWh. Dla tego przypadku przyjęto magazyn energii w postaci baterii litowo-jonowych o pojemności 50 kWh i mocy falownika 10 kW. Dzięki temu rozprawa nie zatrzymała się na poziomie modelu laboratoryjnego, lecz została odniesiona do warunków zbliżonych do praktyki eksploatacyjnej.

W części walidacyjnej rozpatrzono trzy scenariusze pracy systemu: scenariusz pierwszy – układ bez magazynu energii, scenariusz drugi – układ z magazynem sterowanym algorytmem regulowym, oraz scenariusz trzeci – układ z magazynem sterowanym autorskim algorytmem optymalizacji opartym na algorytmie genetycznym. Taki dobór przypadków był metodologicznie trafny, ponieważ pozwolił porównać nie tylko dwie strategie sterowania, lecz również odnieść ich efektywność do wariantu bazowego, pozbawionego magazynu. Dzięki temu możliwe było oddzielenie korzyści wynikających z samej obecności magazynu od korzyści wynikających ze sposobu jego sterowania.

Ważnym składnikiem realizacji celu była także ocena jakości predykcji. Autor trenował sieci LSTM na historycznych danych meteorologicznych i pomiarowych, a następnie oceniał ich skuteczność z użyciem wskaźników takich jak średni błąd bezwzględny (MAE), pierwiastek średniego błędu kwadratowego (RMSE) oraz współczynnik determinacji. Miało to znaczenie fundamentalne, ponieważ autorski algorytm optymalizacji działa w horyzoncie day-ahead, a jego skuteczność zależy od jakości danych wejściowych. W tym sensie doktorant trafnie przyjął, że osiągnięcie celu pracy wymaga nie tylko rozwiązania problemu optymalizacji, ale również wiarygodnego oszacowania przyszłej generacji energii z OZE.

W mojej ocenie cele pracy zostały sformułowane spójnie, a ich realizacja została podporządkowana logicznemu ciągowi działań badawczych: od rozpoznania luki w literaturze, przez budowę modelu, opracowanie algorytmu, dobór metod predykcyjnych i optymalizacyjnych, aż po wielowariantowe badania symulacyjne i walidację na danych rzeczywistych. Teza pracy nie ma charakteru deklaratywnego, lecz warunkowy, co należy uznać za jej zaletę. Doktorant nie twierdzi bowiem, że każda metoda wykorzystująca sztuczną inteligencję zawsze poprawia wynik, lecz że poprawa ta występuje przy odpowiednio dobranej pojemności magazynu. Z przeprowadzonych analiz wynika, że właśnie taki warunkowy charakter tezy został w pracy zasadniczo potwierdzony.

4. Uwagi merytoryczne do pracy

1. Istotna część analiz wariantowych została przeprowadzona przy założeniu doskonałej predykcji danych wejściowych, co autor sam wyraźnie zaznacza. Zabieg ten jest metodologicznie zrozumiały jako próba wyznaczenia teoretycznego maksimum efektywności algorytmu, jednak jednocześnie ogranicza możliwość bezpośredniego przenoszenia uzyskanych wyników ekonomicznych na warunki rzeczywiste. W praktyce jakość prognozy generacji OZE stanowi jeden z głównych czynników determinujących skuteczność harmonogramowania pracy magazynu energii.
2. Koszt degradacji został sprowadzony do jednostkowego kosztu energii wynikającego z ceny zakupu magazynu, jego pojemności i liczby cykli pracy. Takie podejście jest przejrzyste i użyteczne obliczeniowo, lecz nie uwzględnia wpływu głębokości cyklu, średniego poziomu SoC, temperatury pracy, mocy chwilowej ani starzenia kalendarzowego. W efekcie rzeczywisty koszt eksploatacyjny zasobnika może być inny niż przyjęty w modelu, co ma znaczenie zwłaszcza wtedy, gdy przewaga algorytmu GA nad RB opiera się właśnie na intensywniejszym wykorzystaniu magazynu.
3. W części symulacyjnej autor przyjął stałą cenę zakupu energii elektrycznej na poziomie 1,10 zł/kWh, podczas gdy cena sprzedaży jest modelowana dynamicznie. Taki zabieg upraszcza analizę, jednak osłabia realizm ekonomiczny modelu, ponieważ współczesne mechanizmy taryfowe i rynkowe coraz częściej wprowadzają większą zmienność również po stronie zakupu energii. Może to wpływać na ocenę opłacalności arbitrażu cenowego oraz na wartość wyznaczanego harmonogramu pracy magazynu.

4. Praca przekonująco pokazuje, że algorytm GA może dawać lepsze wyniki niż RB, jednak skala tej przewagi jest zależna od przyjętych parametrów: pojemności magazynu, warunku końcowego SoC, struktury cen energii, profilu obciążenia i jakości predykcji. W związku z tym niektóre mocniej sformułowane konkluzje dotyczące opłacalności arbitrażu lub wyższości określonej strategii mogłyby zostać bardziej wyraźnie opatrzone zastrzeżeniem, że odnoszą się do analizowanych scenariuszy i założeń modelowych, a nie mają charakteru całkowicie ogólnego.
5. W pracy wskazano, że sieci LSTM uczono na danych historycznych obejmujących okres 6 miesięcy, tj. od 1.07.2024 r. do 31.12.2024 r., natomiast oceny skuteczności predykcji dokonano dla pełnego roku 2025. Wydaje się, że wartościowe byłoby szersze uzasadnienie, dlaczego przyjęto właśnie taki zakres zbioru uczącego oraz czy rozważano wpływ wydłużenia okresu uczenia na dokładność prognoz, zwłaszcza w odniesieniu do sezonowości zjawisk meteorologicznych. Taka uwaga nie podważa poprawności zastosowanego podejścia, ale dotyczy jego pełniejszego uzasadnienia metodologicznego.
6. Autor zaznacza, że w zgromadzonych danych pomiarowych wystąpiły kilkudniowe przerwy, które uzupełniono odpowiednio przez wykorzystanie modelu predykcyjnego dla generacji OZE oraz przez kopiowanie profilu zużycia z dnia poprzedniego dla obciążenia. Rozwiązanie to jest praktyczne i zrozumiałe, jednak zasadne wydaje się pytanie, czy i w jakim stopniu taka procedura mogła wpłynąć na końcowe wyniki ekonomiczne oraz porównanie scenariuszy sterowania. Byłaby to raczej prośba o doprecyzowanie skali wpływu tego zabiegu niż zarzut wobec samej metodyki.
7. W pracy przeprowadzono wartościową analizę wrażliwości, koncentrując się przede wszystkim na pojemności magazynu energii oraz wymaganym stanie naładowania na koniec dnia. Można jednak zauważyć, że interesującym uzupełnieniem byłoby odniesienie się także do wpływu innych parametrów, takich jak sprawność magazynu, moc znamionowa układu czy poziom ceny zakupu energii. Taka uwaga nie umniejsza wartości przedstawionych badań, lecz wskazuje możliwy kierunek ich dalszego rozwinięcia.
8. W zakończeniu pracy autor stwierdza, że opracowane narzędzie może zostać wykorzystane do pracy z dowolnym magazynem energii. Jest to wniosek zbyt szeroki w stosunku do przeprowadzonych badań, ponieważ w pracy analizowano wyłącznie magazyn energii elektrycznej o określonych parametrach i uproszczonym modelu bilansowym. Przeniesienie algorytmu na inne technologie magazynowania, zwłaszcza o odmiennym dynamice, sprawności, ograniczeniach mocy i mechanizmach degradacji, wymagałoby osobnej weryfikacji.

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie zmniejszają merytorycznej wartości pracy.

5. Uwagi edytorskie do pracy

Do najważniejszych uwag edytorskich należy zaliczyć brak pełnej konsekwencji w zakresie interpunkcji, zapisu skrótów, oznaczeń rysunków i tabel oraz jednostek. Już we wprowadzeniu widoczne są drobne usterki redakcyjne, takie jak niejednolity zapis podpisów rysunków i odwołań bibliograficznych (s. 10), błędy interpunkcyjne i składniowe (s. 10–12), a także literówki i niezręczności językowe, np. „rozporoszonej” czy „w sektorze a energetyki prosumenckiej” (s. 11). Podobne uchybienia pojawiają się również w dalszych częściach pracy, m.in. w rozdziale literaturowym, gdzie można wskazać błędy typu „mirkosieci”, „superkondensatorów” czy „zaawansowanych” (s. 15–24), a także w części modelowej i wynikowej, gdzie widoczne są niedopracowane opisy tabel, zmiennych i pojedyncze błędy korektorskie, np. „Matlab&Simulink” (s. 51), „Rzeczywisty wyniki finansowy...” (s. 57) czy „Konfiguracja sprzętowa układu obejmuje...” (s. 76). Zauważalna jest również niepełna

jednolitość w sposobie odwoływania się do rysunków i ich numeracji w dalszej części rozprawy (s. 93–101). Uchybienia te nie wpływają na merytoryczną wartość pracy, jednak wskazują, że tekst wymagałby jeszcze staranniejszej korekty językowej i redakcji technicznej.

6. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska 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* stanowi oryginalne i wartościowe opracowanie naukowe z zakresu nowoczesnych metod zarządzania energią w lokalnych systemach elektroenergetycznych.

Autor podjął aktualny i istotny problem badawczy, osadzony w realiach współczesnej transformacji energetycznej i rosnącego znaczenia odnawialnych źródeł energii oraz magazynów energii. W rozprawie wykazał dobrą orientację w stanie wiedzy, umiejętność samodzielnego formułowania problemu badawczego, doboru właściwego warsztatu badawczego oraz poprawnego prowadzenia analiz modelowych, symulacyjnych i walidacyjnych. Na szczególne podkreślenie zasługuje opracowanie autorskiego algorytmu harmonogramowania pracy magazynu energii, połączenie metod predykcyjnych opartych na sieciach LSTM z algorytmem genetycznym oraz weryfikacja proponowanego rozwiązania z wykorzystaniem danych rzeczywistych. Wysoko należy ocenić również zakres przeprowadzonych badań oraz sposób weryfikacji zaproponowanego rozwiązania.

W mojej ocenie rozprawa potwierdza, że Kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*, umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz zdolność do rozwiązywania problemów o istotnym znaczeniu poznawczym i aplikacyjnym. Przedmiot pracy stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a jednocześnie ma wyraźny potencjał praktyczny i wdrożeniowy.

Zgłoszone w recenzji uwagi merytoryczne i edytorskie mają charakter dyskusyjny i nie podważają wartości naukowej rozprawy ani osiągniętego przez Doktoranta rezultatu badawczego.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Bartłomieja Borkowskiego spełnia wymagania określone w art. 187 *Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* mieści się w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.

Wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie mgr inż. Bartłomieja Borkowskiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny rozprawy, aktualność podjętej problematyki, oryginalność zaproponowanego rozwiązania oraz znaczenie uzyskanych wyników dla rozwoju nowoczesnych hybrydowych systemów zasilania, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

