

Prof.dr hab.inż. Janusz Kotowicz  
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Politechnika Śląska  
Ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice  
e-mail: [janusz.kotowicz@polsl.pl](mailto:janusz.kotowicz@polsl.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 magazyn energii”**

**A. Wprowadzenie**

Od kilkunastu lat w UE, a także w Polsce obserwuje się dynamiczny wzrost udziału OZE w systemie elektroenergetycznym. Na koniec 2025 roku ponad 50% mocy zainstalowanej w naszym kraju, pochodziło z OZE, łączyło się to z 31.4% udziałem w produkcji energii elektrycznej. Głównymi filarami zielonej energii w Polsce są farmy wiatrowe oraz fotowoltaika. Mając na uwadze zmienność wytwarzania energii z OZE, a także rosnące różnice między charakterystykami czasowymi wytwarzania i konsumpcji energii elektrycznej konieczne jest integrowanie tych technologii z technologiami magazynowania energii. Jest to warunek konieczny dla dalszego wzrostu udziału wytwarzania energii elektrycznej z OZE. Aby dobrze wykorzystać możliwości integracji obu technologii (OZE i magazynowania) koniecznym staje się wprowadzenie systemu zarządzania pracą magazynu energii. Pozwoli to w szczególności prosumetom i operatorom mikro sieci na efektywne wprowadzenie i finansowanie tego. Przyczynić się to powinno także do obniżenia dynamiki wzrostu cen energii elektrycznej, jak i zwiększeniu stabilności i elastyczności systemu elektroenergetycznego.

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Wpłynęło dnia ..... 18.05.2021

Uwzględniając powyższe, tematykę pracy mgr inż. Bartłomieja Borkowskiego należy uznać za ważną zarówno z poznawczego jak i utylitarного charakteru prac naukowo-badawczych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

## **B. Zakres rozprawy**

Praca doktorska mgr inż. Bartłomieja Borkowskiego zawiera łącznie 112 stron, na które składa się 8 numerowanych rozdziałów, streszczenie w języku polskim i angielskim, tabela skrótów i literatura.

Rozdział pierwszy to krótkie wprowadzenie. Autor podkreśla tu rozwój technologii OZE w UE, a w szczególności w Polsce, Wskazuje na konieczne działania związane z ich dalszym, dynamicznym wzrostem tj. wprowadzeniem technologii magazynowania energii i różnych mechanizmów rozliczeń w sektorze energetyki prosumenckiej.

Rozdział drugi to przegląd literatury. Przedstawiono tu hybrydowe systemu zasilania oraz algorytmy zarządzania energią (w szczególności metody: oparte na regułach, deterministycznej i sztucznej inteligencji).

Rozdział trzeci to „Cel, zakres i teza pracy”. Pomocnym w ich sformułowaniu były wnioski z rozdziału 2. Celem rozprawy jest opracowanie i zbadanie działania zaawansowanego algorytmu pracy magazynu energii zintegrowanego z odnawialnymi źródłami energii w Hybrydowym Systemie Zasilania. Zadaniem algorytmu będzie optymalizacja przepływu energii elektrycznej... .

Rozdział czwarty zatytułowany jest: „Autorski algorytm harmonogramowania pracy magazynu energii zintegrowanego z hybrydowym systemem zasilania”. Zadaniem algorytmu jest sterowanie pracą magazynu energii w taki sposób, aby gromadzić energię elektryczną w okresach niskich cen sprzedaży a oddawać ją do sieci, kiedy cena ta jest maksymalna. Realizowane to jest za pomocą funkcji celu (równanie 4.1.). Funkcja ta maksymalizuje bilans ekonomiczny wymiany energii z siecią elektroenergetyczną, z uwzględnieniem zdefiniowanych kosztów magazynowania energii (równanie 4.9). Algorytm uwzględnia także zmienne:

- Ceny zakupu i sprzedaży energii elektrycznej (chwilowe dane rynkowe)
- Obciążenie lokalne
- Dane meteorologiczne

Uwzględniane są także dane znamionowe i ograniczenia magazynu energii. Także ze względu na dużą liczbę zmiennych do rozwiązania funkcji celu, Autor zastosował metodę algorytmu w środowisku Matlab przy wykorzystaniu odpowiedniej biblioteki. Niezbędne dla wyznaczenia funkcji celu dane dotyczące produkcji energii z OZE, mgr inż. Bartłomiej Borkowski wyznaczył wykorzystując sieci neuronowe (LongShort-Term Memory). Schemat blokowy algorytmu harmonogramowania i jego implementację Autor przedstawił w rozdziale 4.2.

W rozdziale 5-tym Autor skupił się na Hybrydowym Systemie Zasilania tj. panelu fotowoltaicznym (PV) małych turbin wiatrowych i magazynie energii (BESS). W rozdziale tym przedstawiono modele matematyczne tych elementów. Ważnym elementem modelu są przekształtniki elektroniczne (do konwersji i sterowania przepływami energii między wymienionymi elementami i siecią). Pracę całości systemu symulowano przy użyciu oprogramowania MATLAB/Simulink oraz przy wykorzystaniu oprogramowania specjalistycznego z biblioteki Simscape Electrical. Wyniki symulacji pracy modelu Hybrydowego Systemu Zasilania typu słoneczno-wiatrowego z magazynem energii, mgr inż. Bartłomiej Borkowski pokazał w rozdziale szóstym. Obliczenia przeprowadzone dla mocy PV – 7kWp i mocy TW – 2kW i oraz mocy znamionowej magazynu 3kW (przy pojemności 5; 10; 15kWh). Obliczenia zrealizowano dla całego roku 20205 (1.01.-31.12) zakładając:

- Minimalny i maksymalny stan naładowania magazynu jego sprawność (ładowania i rozładowania) oraz jednostkowy koszt degradacji magazynu (równanie 4.9; Tab. 6.1).
- Optymalizację harmonogramu pracy ustawiono na 24h (od 00.00:24.00)

Ponadto wykorzystano rzeczywiste dane:

- a) Meteorologiczne
- b) Dotyczące dynamicznej ceny sprzedaży elektryczności (serwis PSE)

- c) Ceny zakupu elektryczności (1.1 zł/kWh)
- d) Dotyczące profilu zużycia elektryczności (na 2025 rok).

Przedstawiono wyniki symulacji efektywności energetycznej i ich analizę dla wrażliwości od pojemności magazynu :

- A) HSZ z algorytmem regułowym
- B) HSZ z algorytmem genetycznym

Przeprowadzono także oprócz wpływu badań pojemności magazynu na efektywności ekonomiczną także badania wpływu wymaganego stanu naładowania na koniec dnia (SoC) – porównując ze sobą w/w A i B.

W rozdziale siódmym przedstawiono analizę pracy hybrydowego systemu zasilania typu słoneczno-wiatrowego zintegrowanego z magazynem energii. Celem przeprowadzonych obliczeń była ocena korzyści finansowych z wdrożenia magazynu energii oraz efektywności działania systemu w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Symulacje przeprowadzono wykorzystując dane pomiarowe z konkretnej instalacji (fotowoltaicznej o mocy 17 kWp i dwóch turbin wiatrowych o mocy 2kW każda). Umożliwiło to w pierwszym rzędzie korelację predykcji (przy wykorzystaniu SN) z danymi pomiarowymi zarówno dla instalacji FV jak i turbin wiatrowych (głównie mocy). W dalszym ciągu badano szczegółowo 3 scenariusze:

1. HSZ baz magazynu energii
2. HSZ z magazynem energii i prostym algorytmem bilansowania (RB)
3. HZS z magazynem energii i opracowanym przez mgr inż. B. Borkowskiego algorytmem optymalizacji.

Dla wszystkich wariantów wyznaczono i porównano szereg wskaźników techniczno-ekonomicznych. Roczny koszt zakupu energii w scenariuszu 3 jest mniejszy niż w pozostałych; to samo dotyczy całkowitego kosztu (z uwzględnieniem kosztu degradacji magazynu).

Rozdział ósmy to krótkie, dwustronne syntetyczne podsumowanie i wnioski. Pracę kończy literatura, którą stanowią 73 pozycje, w tym jedna, gdzie mgr inż. Bartłomiej Borkowski jest pierwszym autorem.

### **C. Ocena rozprawy**

1. Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest ważna i interesująca. Praca jest napisana przejrzysto i podzielona na logiczne, wynikające z układu pracy rozdziały. Wymagała ona od Autora dobrego opanowania zagadnień teoretycznych, związanych z energetyką (dyscypliną: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka), opracowania algorytmów obliczeniowych, wykonania obliczeń numerycznych, opracowania i analizy wyników (zarówno obliczeniowych jak i pomiarowych).
2. Autor w pracy opracował model matematyczny Hybrydowego Systemu Zasilania, składający się z paneli fotowoltaicznych (zintegrowanych z przekształtnikami energoelektronicznymi), turbin wiatrowych (sprzężonych z prądnicą) i magazynu energii. Do modelu wprowadzony zostaje profil obciążenia lokalnego.
3. Do symulowania pracy całości w/w HSZ Autor wykorzystał pakiet oprogramowania MATLAB/Simulink oraz specjalistyczną bibliotekę Simscape Electrical.
4. W pracy mgr inż. B. Borkowski opracował autorski algorytm harmonogramowania pracy magazynu energii zintegrowanego z HSZ. Algorytm oparty jest o funkcję celu maksymalizującą bilans ekonomiczny wymiany energii z siecią elektroenergetyczną.
5. W/w Algorytm uwzględnia szereg danych i zmiennych (patrz punkt B recenzji. Do rozwiązania funkcji celu Autor wykorzystał algorytmy genetyczne implementując go w środowisku Matlab przy wykorzystaniu biblioteki Global Optimization Toolbox.
6. W przypadku braku danych dotyczących produkcji z OZE (FV, TW) predykcje przyszłej generacji Autor dokonuje z wykorzystaniem SSN (LongShort-Term Memory).

7. Poprawność predykcji została sprawdzona przy wykorzystaniu danych rzeczywistej instalacji solarnej (o mocy 17 kWp) oraz rzeczywistej instalacji TW (2 x 2kW). Uzyskaną poprawność określiłbym jako dostateczną (zadowalającą).
8. Przeprowadzone przez Autora analizy wrażliwości wykazały, że do oceny efektywności ekonomicznej magazynu i wyboru najkorzystniejszej opcji muszą być brane pod uwagę pojemności magazynu oraz stan naładowania na koniec dnia.
9. Autor w pracy porównał szereg wskaźników techniczno-ekonomicznych dla HSZ (bez magazynu i z magazynem, sterowanym przez Niego opracowanym algorytmem lub algorytmem RB). Roczny koszt zakupu energii, jak i całkowity koszt jest najmniejszy przy zastosowaniu algorytmu zaproponowanego mgr inż. Bartłomieja Borkowskiego.
10. Opracowane rozwiązanie stanowi gotowy produkt, który może wspierać proces transformacji energetycznej, w głównej mierze dając prosumentom, jak i operatorom mikrosieci narzędzie do efektywnego ekonomicznie zarządzania magazynem energii w warunkach rynkowych.

#### **D. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

##### **Uwagi krytyczne**

1. Skąd wynika różnica w mocach gałęzi równoległych modułów ( 3,2 kWp 3,6 kWp) – podanych na str. 47.
2. Rys. 5.7, Rys. 5.8, Rys. 5.9 (str. 52-53) – są błędnie ponumerowane. Powinny być Rys. 5.11, Rys. 5.12 i Rys. 5.13. Trzeba również zmienić odwołania w tekście.
3. Rys. 5.10 (str. 50) – nie jest właściwie opisany (to są charakterystyki bezwymiarowej mocy i prędkości obrotowej odniesione do wartości minimalnych).
4. Brak opisu osi pionowej na Rys. 6.15.
5. W opisie pod rysunkami 6.7 i 6.8 (str. 63 i 64) przejrzyściej by było, gdyby dodano miesiąc do którego się odnoszą.
6. W założeniach na str. 76 punkt 7.2 brakuje informacji, jakiego okresu dotyczy „łączne zapotrzebowanie na energię elektryczną 18 000 kWh).

## Uwagi dyskusyjne

1. Niejasne (nieprzejrzyste) jest sformułowanie na str. 58:  
„Profil obciążenia przyjęto na podstawie profili standardowych zużycia energii [18] skalowany na rok 2025. Dienne zużycie energii ustalono na poziomie 10 kWh dla każdego dnia symulacji – Rys. 6.5”. Pytanie jest: czy dla każdego dnia przyjmowano zużycie 10 kWh?
2. W obliczeniach – założeniach do symulacji na str. 61 – brakuje maksymalnej mocy rozładowania magazynu – wielkości te występują w równaniu 5.13 Warto problem tych wielkości przedyskutować.
3. Proszę zinterpretować wynik finansowy systemu (tzw 1) wynik) z tabeli 6.2. na str. 64.
4. Warto byłoby policzyć dla instalacji badanych w rozdziale 7 (FV i TW) wskaźnik wykorzystania mocy znamionowej. Proszę je zdefiniować i oszacować ile mogą wynosić.

## E. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Bartłomieja Borkowskiego pt. **„Hybrydowy System Zasilania, wykorzystujący metody sztucznej inteligencji, do optymalizacji pracy lokalnego systemu elektroenergetycznego wyposażonego w źródła OZE i magazyn energii”** zawiera sformułowanie ważnych w energetyce (dyscyplinie: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka) zadań badawczych, ich dyskusję i rozwiązanie.

W opinii końcowej chcę także podkreślić złożoność badanych problemów, budowy skomplikowanych modeli, obliczeń i analizy wyników. Autor w ich przeprowadzeniu wykazał się bardzo dobrą wiedzą i skalą umiejętności w posługiwaniu się technikami modelowania i analizy oraz interpretacji wyników oraz ich dyskusji.

Poziom merytoryczny rozprawy tworzy zamkniętą całość, potwierdzającą dojrzałość Doktoranta do prowadzenia badań naukowych.

Uważam, że opiniowana praca mgr inż. Bartłomieja Borkowskiego spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach - podstawa prawna: art. 187 ust. 1 i 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022r., poz. 574 z późn. zm.) i zasługuje na pozytywną opinię. Wobec powyższego stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*Gliwice, 6.05.2026*

*Janusz Kotowicz*

