

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Laskowskiego

pt. „Badanie wykorzystania mikrosieci jako wysp energetycznych integrujących prosumentów, producentów i odbiorców przy wykorzystaniu inteligentnej infrastruktury sieciowej” .

Promotor pracy : prof. dr. hab. inż. Jan Kiciński dr hc. multi.

Podstawa prawna oceny : Pismo BRN.520.2.2025 Z-cy Dyrektora IMP PAN dr hab. inż. Grzegorza Żywicy prof. IMP PAN z dnia 16.04.2025 r.

1. Ocena problematyki rozprawy.

Problemy badawcze związane z pozyskiwaniem wiedzy wspomagającej zastosowania mikrosieci jako wysp energetycznych - integrujących prosumentów, producentów i odbiorców przy wykorzystaniu inteligentnej infrastruktury sieciowej - należą do grupy zagadnień badawczych ciągle rozwijanych w licznych ośrodkach naukowo-badawczych w kraju i zagranicą. Dotyczy bowiem kwestii wzrostu udziału OZE i decentralizacji produkcji energii, w tym zabezpieczenia dostępu do energii elektrycznej podczas awarii w sieci głównej, co zwiększa bezpieczeństwo energetyczne w bazach wojskowych, czy na terenach odizolowanych.

Tematyka rozprawy doktorskiej jest zgodna z kierunkami rozwoju nowoczesnej inżynierii energetycznej i mechanicznej, a także wpisuje się w strategię UE dotyczące niezależności energetycznej i zrównoważonego rozwoju.

Poszukiwane w rozprawie rozwiązania są niezbędnym warunkiem rozwoju nowej wiedzy projektowej pomocnej w procesach optymalizujących dobór oraz pracę elektrycznych źródeł wytwórczych. Są elementem realizacji analiz dotyczących wpływu obciążenia układu sieciowego, lokalizacji przyłączenia urządzeń, co wpisują się w poszukiwania efektywnych metod wsparcia i optymalizacji procesów decyzyjnych określających zarządzanie Krajowym Systemem Elektroenergetycznym.

Współczesna wiedza w zakresie budowy inteligentnej infrastruktury sieciowej otworzyła nowe możliwości rozwoju metod diagnostyki nad zadaniami : wykorzystania mikrosieci jako energetycznych wysp, identyfikacji ich głównych zalet, a także analizy możliwych ograniczeń ich funkcjonowania w połączeniu z krajową siecią elektroenergetyczną, jak i niezależnie od niej. Obecne w niej rozwiązania dostarczają wiedzy określającej wpływ uwarunkowań ekonomicznych i technicznych na ocenę ich pracy z punktu widzenia: zarządzania energią, czy rozstrzygnięć odnoszących się do ich elastyczności, bądź skalowalności .

Doktorant z tym kierunkiem poszukiwań związał swoje badania. Na bazie analizy dostępnej literatury przeprowadził niezbędną analizę charakterystyk: rynku energii, uwarunkowań funkcjonowania krajowego systemu energetycznego oraz mikrosystemów energetycznych. W szczególności zwrócił uwagę na technologie wytwarzania i magazynowania energii elektrycznej oraz omówił obecne warunki ich funkcjonowania na rynku energii elektrycznej. Podjął próbę zdefiniowania wybranych zadań optymalizacyjnych w zakresie optymalnego doboru źródeł wytwórczych, lokalizacji ich przyłączenia do zaprojektowanego układu sieciowego, a także opracowanie algorytmów projektowania mikroukładu bazującego na dwusekcyjnej magistrali. Dokonał wielowymiarowych obliczeń optymalizacyjnych dla mikrosystemu testowego. Sprawdził swoją koncepcję badawczą na danych monitorowanych w gminie

Miastkowo u ponad 220 odbiorcach energii elektrycznej, u których zamontowano konieczną instrumentalizację pomiarową. Umożliwiły one zweryfikowanie warunków współpracy mikro sieci jako wysp energetycznych z Krajowym Systemem Energetycznym

Badania Doktoranta nakreśliły istotne wyróżniki uzyskanych wyników, przy jej realizacji. Pozwoliły mu na sformułowanie tezy rozprawy - mówiącej o możliwości poprawy wskaźników charakteryzujących skuteczność działania sieci energetycznej przy uwzględnieniu zaprojektowanego w pracy rozwiązania mikrosystemu energetycznego. Mają one wymiar narzędzi i wskazań projektowych do budowy wysp energetycznych bazujących na mikro sieci. Mogą znaleźć liczne aplikacje w budowanych systemach sieci energetycznych.

Rozprawa porusza wiele zagadnień z zakresu inżynierii mechanicznej związanych z zagadnieniami: budowy modelu matematycznego zachowań mikro sieci energetycznych. W swoich badaniach i analizach obliczeniowych Doktorant korzystał z zaawansowanych narzędzi inżynierskich tj. NEPLAN, czy Homer Pro. Z ich pomocą wykonywał analizy funkcjonowania infrastruktury sieciowej, w tym zadań, planowania, optymalizacji, czy symulacje mikrosystemów energetycznych przy zaimplementowanych danych, a także oceny wrażliwości na wybrane parametry jej układu.

Podjęcie tego tematu przez Doktoranta i jego realizację oceniam jednoznacznie pozytywnie. Z punktu widzenia walorów poznawczych i praktycznych, recenzowana praca doktorska **jest poznawczo niezmiernie ważna i aktualna.**

Spełnia wszystkie oczekiwania jakie wiązać można z tematem pracy doktorskiej. Jest ona atrakcyjna aplikacyjnie i naukowo, i dobrze wkomponowując się w współczesne potrzeby i trendy badawcze związane z poszukiwaniami nowych wskazań diagnostycznych dla budowy mikro sieci jako wysp energetycznych - integrujących prosumentów, producentów i odbiorców przy wykorzystaniu inteligentnej infrastruktury sieciowej.

2. Analiza zawartości rozprawy.

Przechodząc do ogólnej charakterystyki rozprawy mgr inż. Michała Laskowskiego stwierdzam, że opiniowana praca doktorska stanowi bardzo obszerne analityczno-eksperymentalne studium problemów związanych z projektowaniem i eksploatacją mikro sieci jako wysp energetycznych - integrujących prosumentów, producentów i odbiorców przy wykorzystaniu inteligentnej infrastruktury sieciowej. Ma ona bardzo dobrą egzemplifikację w mikro sieci na terenie Gminy Miastkowo, będącej wiejską jednostką administracyjną o rozproszonej zabudowie, co określiło specyficzne wyzwania energetyczne sformułowane w treściach podjętych przez doktoranta badań. Zostały one scharakteryzowane i przedstawione na 192 stronach. Są raportowane w: 9 rozdziałach, 76 rysunkach, 26 tabelach, uzupełnionych wykazem 82 odnośników literaturowych do treści pracy, streszczeniem (w jęz. polskim i angielskim) oraz wykazem ważniejszych oznaczeń.

Streszczenie pracy doktorskiej w sposób klarowny nakreśla podjęte zadanie badawcze z jego egzemplifikacją praktyczną. Jego informacyjny przekaz i zawarte w nim treści są właściwe do zrozumienia istoty podjętego przez Doktoranta zadania badawczego. Punktuje jej przesłanie badawcze, przyjęte metody badawcze, ich narzędzia, uzyskane wyniki oraz wynikające z nich wnioski.

Rozdział 1 rozprawy stanowi wprowadzenie do problemu naukowego poruszonego w pracy. Przedstawia jego motywację oraz podłoże naukowe celowości jego podjęcia. Umiejscawiają ideę programową rozprawy w tle dynamicznych zmian w sektorze energetycznym stymulowanym rozwojem: technologii, świadomości ekologicznej klientów oraz presji unormowań regulacyjnych związanych z potrzebą dostosowania instalacji do współczesnych technologii produkcji energii elektrycznej. Punktuje wynikające z nich potrzeby budowy nowego modelu dystrybucji energii i systemu zarządzania jego pracą. W sposób przekonujący nawiązuje do podjętych zadań

badawczych rozprawy i pojętych prób ich weryfikacji na prototypie zbudowanego przez doktoranta mikrosystemu testowego, w którym zainstalował w 2022 roku odpowiednie urządzenia pomiarowe u ponad 260 lokalnych odbiorców energii elektrycznej,

Rozdział 2 skupia uwagę na prezentacji struktury Krajowych Sieci Elektroenergetycznych funkcjonujących w Polsce i powiązanych z nimi zadań przypisanych Operatorom (OSP, OSD) Systemu Przesyłowego i Dystrybucyjnego. Prezentuje stan wiedzy odnoszący się do technicznych i organizacyjnych uwarunkowań funkcjonowania systemu elektroenergetycznego w Polsce, w tym odnoszące się do: sieci elektroenergetycznych, mikrosystemu elektroenergetycznego niskiego napięcia, rynku energii - w tle zmian jakie zachodzą w gospodarce. Omawia charakterystykę techniczną podstawowych urządzeń wchodzących w ich skład tj. : źródła małej mocy, magazyny energii elektrycznej, odbiory sterowalne, przekształtniki, czy aparatura zabezpieczeniowa. Prezentowany w tym rozdziale materiał jest dobrą perspektywą dla przyjętego przez Doktoranta zadania badawczego.

W rozdziale 3 ma miejsce przedstawienie charakterystyki wybranego do badań obszaru lokalizacji mikrosieci energetycznej, w gminie Miastkowo . Dokonuje analizy jej funkcjonowania na jakości powietrza poprzez analizę emisji poszczególnych zanieczyszczeń, na podstawie wybranej do badań część wsi Miastkowo, w której na potrzeby badawcze wdrożono ponad 260 urządzeń pomiarowych u odbiorców energii elektrycznej. Pozwoliły one na **zidentyfikowanie** rzeczywistych przebiegów zapotrzebowania na energię elektryczną , a także dokonanie klasyfikacji odbiorców ze względu na taryfy i sezonowość odbiorów. Treści tego rozdziału można uznać za autorski wkład wiedzy do zagadnień projektowania mikrosieci energetycznych.

Rozdział 4 zawiera omówienie problemu optymalizacji, który odnosi do warunków procesu budowy i działania mikrosystemu elektroenergetycznego zaproponowanego w rozprawie. Ujmuje on kwestie określenia parametrów jej struktury tj: mocy zainstalowanej sieci, zasobników, produkcji energii elektrycznej, wymiany mocy w zasobnikach energii podczas przepływu prądu za pomocą sieci dystrybucyjnej , czy też kwestie budowy nowych linii zabezpieczających techniczne możliwości pracy wyspowej. Analizuje uwarunkowania związane z procesem dynamicznej optymalizacji, czyli jej adaptacją w czasie rzeczywistym do zmiennych warunków zapotrzebowania i produkcji oraz statycznej optymalizacji, warunkowanej potrzebami długoterminowego planowania konfiguracji systemu. Zawarte w tym rozdziale komentarze i analizy służą właściwemu wyartykułowaniu realizacji celu podjętego zadania badawczego, wypunktowaniu potrzeby poszukiwań autorskich rozwiązań modyfikacyjnych w zakresie projektowania optymalnego mikro systemu energetycznego..

Kolejny rozdział 5 jest prezentacją głównych elementów rozprawy. Artykułuje cel i tezy rozprawy oraz naświetla wykonawcze elementy podjętego problemu badawczego. Ukierunkowano go na zadanie opracowania metody optymalizacji mikrosystemu energetycznego - minimalizującego wycenę krańcowego kosztu energii elektrycznej oraz śladu węglowego przy zachowaniu potrzeb odbiorców. Prezentuje autorskie narzędzie Microgrid Desing and Simulation (MDS) służące potrzebom optymalizacji działania systemu dystrybucyjnego, w tym pracom projektowym nad wyborem struktury sieci pracującej w trybie wyspowym. Kreśli reguły wykorzystania narzędzi programowych NEPLAN w obliczeniowych procedurach: planowania, optymalizacji oraz analizy funkcjonowania infrastruktury sieciowej.

Treści tego rozdziału zawierają dobrze wybrane prezentacje i analizy pomocne w zadaniach oceny tezy rozprawy, jaką w jej przesłaniu jest stwierdzenie możliwości skutecznego zaprojektowania i weryfikacji technicznej funkcjonowania mikrosystemu elektroenergetycznego AC/DC, zdolnego do pracy wyspowej, przy użyciu autorskiego narzędzia MDS . Uzupełnia ją ponadto hipotezę stwierdzająca porównywalność jakości wyników uzyskanych za pomocą MDS z innymi zaawansowanymi metodami optymalizacji dynamicznej.

Rozdział 6 zawiera informacje odnoszące się przebiegu badań weryfikujących zaproponowane w rozprawie rozwiązanie. Opisuje i analizuje opracowany demonstrator mikrosystemu Miastkowo, który został zbilansowany i zoptymalizowany przez Doktoranta według Jego autorskiej metody projektowej, przy uwzględnieniu parametrów jednostek wytwórczych, profili odbiorców energii elektrycznej. Analizie poddano osiem trybów pracy mikrosieci, w tym np. tryb wyspowy, czy funkcjonującego przy wsparciu KSE, co jest dowodem kompleksowego podejścia do zagadnień sterowania i automatyki. Definiuje również warunki konieczne do bez uciennego przejścia do wyspowego trybu pracy, bez naruszenia parametrów jakościowych energii elektrycznej, co ma również podstawowe znaczenie praktyczne. Dla każdego trybu Doktorant opisuje algorytmy sterowania urządzeniami, określając warunki pracy wyspowej bez wpływu na jakość energii (np. stabilność napięcia, częstotliwości) i osiągając w ten sposób zasadniczy od strony praktycznej cel wykonalności mikrosieci w założonej lokalizacji. Prezentowane w tym rozdziale badania Doktoranta określiły; *(opracowaną przez niego)*; **nowa bazę wiedzy** pomocną w projektowaniu i eksploatacji mikrosieci jako wysp energetycznych- integrujących prosumentów, producentów i odbiorców przy wykorzystaniu inteligentnej infrastruktury sieciowej - która jest istotnym, nowatorskim rezultatem rozprawy.

Rozdział 7 skupia uwagę na analizie uzyskanych wyników w kontekście ekonomicznych przesłanek ich wdrożenia. Oceny wiąże z ich odniesieniami do nakładów inwestycyjnych jakie towarzyszą wdrażaniu mikrosieci, długotrwałej opłacalności warunkowanej potrzebą stabilizacji kosztów w obliczu zmienności cen rynkowych, i potencjału do zarządzania szczytami zapotrzebowania na energię. Treści te w właściwy sposób uzasadniają rezultaty dokonań Doktoranta.

Kończący pracę rozdział 8 zawiera podsumowanie dokonań rozprawy. Przedstawia listę sformułowanych na ich podstawie wniosków. Kreśli ponadto koncepcję dalszych prac rozwojowych nad rozwojem opracowanego przez Doktoranta narzędzia Microgrid Design and Simulation, zabezpieczającego potrzeby budowy algorytmów optymalizujących procesy zarządzania mikro siecią, szczególnie w zakresie dynamicznego bilansowania energii, czy koordynacji mikrosieci z systemem elektroenergetycznym. Zwraca ponadto uwagę na potrzeby badań nad możliwościami tworzenia większych struktur z wielu mikrosieci, czyli klastrów mikrosieci.

Całość pracy uzupełnia rozdział 9 zawierający spis odniesień literaturowych, który jest właściwie dobrany i wyczerpujący.

Podsumowując ten punkt recenzji stwierdzam, że rozdziały pracy cechuje: przejrzysta struktura, logiczna argumentacja oraz celne prezentacje wyników, które bezpośrednio wspierają tezę rozprawy. Jej tytuł został sformułowany w właściwym brzmieniu, a zawarte w niej treści w pełni z nim korespondują. Zrealizowane i udokumentowane w rozprawie doktorskiej poszukiwania badawcze Autora: skala złożoności podjętych zadań i realizacją wykonanych prac: analitycznych, eksperymentalnych, a także przekazem nowych idei budowy mikrosieci jako wysp energetycznych - integrujących prosumentów, producentów i odbiorców przy wykorzystaniu inteligentnej infrastruktury sieciowej - **w pełni spełniają wymagania** stawiane rozprawom doktorskim.

3. Ocena merytoryczna.

Przechodząc do oceny merytorycznej pracy i sposobu rozwiązania podjętego przez mgr inż. Michała Laskowskiego problem badawczego należy na wstępie podkreślić, że rozprawa doktorska stanowi **wartościową naukową pozycję**, będącą ważnym źródłem informacji dla prac projektowych innowacyjnych rozwiązań inżynierskich w energetyce odnawialnej. W sposób kompleksowy odpowiada na globalne wyzwania związane z potrzebami: integracji odnawialnych źródeł energii, redukcji emisji CO₂, czy transformacją systemów energetycznych w kierunku elastyczności i

niezawodności. W moim przekonaniu znajdzie liczne grono odbiorców wśród osób zajmujących się projektowaniem mikrosieci energetycznych.

Temat pracy można uznać za rozwiązany; *(na etapie zadania doktorskiego)*; w pełni oczekiwaną od niego problemową dociekliwością, z licznymi odniesieniami do prezentowanych i rozwiązywanych w pracy zagadnień. Poszczególne rozdziały rozprawy referują w przekonujący i konsekwentny sposób tok myślowy Doktoranta, który prowadzi do rozwiązania podjętego problemu. Ma on odniesienia w zrealizowanym oryginalnym zadaniu badawczym, i jego weryfikacji.

Rozprawa swoimi treściami przekazuje **nowe wskazania metodyczne oraz informacje wykonawcze** dla procesów budowy i eksploatacji mikrosieci jako wysp energetycznych - integrujących prosumentów, producentów i odbiorców przy wykorzystaniu inteligentnej infrastruktury sieciowej - które zostały zweryfikowane funkcjonowaniem na terenie gminy Miastkowo, będącej wiejską jednostką administracyjną o rozproszonej zabudowie.

Mają one **istotną wartość poznawczą** dla dziedziny wiedzy jaką jest inżynieria mechaniczna i rozwiązywanie powiązanych z nią problemów budowy i eksploatacji mikrosieci energetycznych i urządzeń.

Do istotnych rezultatów rozprawy doktorskiej zaliczam :

- zbudowanie; *(na bazie obszernego, autorskiego materiału analitycznego i eksperymentalnego)*; nowej bazy wiedzy które umożliwia: modelowanie, projektowanie i optymalizację struktury mikrosystemów elektroenergetycznych AC/DC pracujących w trybie wyspowym
- opracowanie autorskiego software'u Microgrid Design and Simulation (MDS), który pozwala poszukiwać rozwiązania prowadzące do: minimalizacji krańcowego kosztu energii elektrycznej, ograniczenie śladu węglowego, czy zachowanie stabilności dostaw energii do odbiorców;
- przeprowadzenie licznych badań eksperymentalnych wymagających od Autora zainstalowania urządzeń monitorujących pobór energii u ponad 220 jej odbiorcach na terenie wsi Miastkowo;
- wskazanie istotnych kierunków rozwojowych opracowanej metody - *w szczególności do budowy mikrosieci jako wysp energetycznych* - które mogą być źródłem inspiracją do dalszych rozwinieć i aplikacji opracowanej i wskazanej przez Autora drogi projektowej.

Mam świadomość, że w edycji obszernego materiału badawczego Doktoranta zawsze może pojawić się pewien niedosyt u czytelnika. Dla mnie związać go można z mało widoczną w realizowanych rozpoznaniach badawczych Kandydata - oceną palety możliwych błędów które mogły pojawić się w procesie badawczym, brak pełniejszej analizy niepewności realizowanych rozpoznań badawczych. Uwaga ta dotyczy kwestii: zarówno oceny możliwych błędów w odniesieniu do realizowanych eksperymentów pomiarowych jak i stosowanych przetworzeń numerycznych, związanych z określającymi je założeniami jakie powinny być spełnione w procesie badawczym. W szczególności w odniesieniu do ograniczeń modelowych lub obliczeniowych jakie mogą pojawić przy stosowaniu MDS dla bardzo dużych lub silnie rozproszonych mikrosieci?

Szkoda, że nie zostały one wypunktowane jako zadania np. przyszłych badań. Są one bowiem istotnym elementem naukowego rozpoznania. Mam nadzieję, że Autor weźmie tą kwestię pod uwagę w swoich dalszych pracach badawczych, co pozwoli na pełniejsze udokumentowanie i pełniejszą ocenę wiarygodności uzyskanych rozpoznań badawczych.

W kontekście zrealizowanej pracy mogą pojawić się pytania do których należałoby odnieść się na obronie:

- czy można określić graniczne warunki poprawnego działania systemu MDS w przypadku dynamicznych zmian obciążenia lub produkcji w mikrosieci wyspowej? – (np. czy narzędzie zachowuje stabilność przy dużej penetracji OZE?)
- czy kryterium minimalizacji krańcowego kosztu energii uwzględnia pełny koszt cyklu życia elementów projektowanego systemu (CAPEX, OPEX)?
- czy struktura mikrosieci wybrana przez MDS pozwala na łatwe skalowanie systemu (np. dołączenie nowych źródeł/odbiorników)?
- jakie są praktyczne bariery wdrożeniowe narzędzia MDS w rzeczywistych projektach mikrosieci?

Poczynione uwagi nie mają wpływu na moją wysoką ocenę przedstawionej mi do recenzji pracy.

Podsumowując ten punkt recenzji stwierdzam, że zarówno wyniki poznawcze, jak i praktyczne dokonania Doktoranta zasługują **na w pełni pozytywną opinię**. Dotyczą one zagadnień perspektywicznych, o istotnych rezultatach naukowych, jak i aplikacyjnych. Doktorant udowodnił możliwość skutecznego projektowania i weryfikacji technicznej funkcjonowania mikrosieci z wykorzystaniem własnego narzędzia, co stanowi istotne potwierdzenie wartości użytkowej i naukowej pracy.

4. Konkluzja.

Biorąc pod uwagę omówione i ocenione wyżej rezultaty rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Laskowskiego nt.: „Badanie wykorzystania mikrosieci jako wysp energetycznych integrujących prosumentów, producentów i odbiorców przy wykorzystaniu inteligentnej infrastruktury sieciowej” **stwierdzam, że Doktorant rozwiązał pewien istotny obszar ważnych aplikacyjnie i naukowo zadań badawczych**, związany z procesami projektowania i eksploatacji mikrosieci energetycznych.

Wyniki rozprawy doktorskiej spełniają wszelkie wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024 poz. 1571 z późn. zm.) i tym samym, jako recenzent tej rozprawy przedkładam wniosek do Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku o jej przyjęcie i dopuszczenie do dalszego procedowania odnośnie nadania stopnia naukowego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie: inżynieria mechaniczna.

Wypracowany przez Doktoranta przekaz wiedzy **nie miał** dotychczas należytego miejsca w przekazie literaturowym. Został wypracowany w szerokich badaniach cechujących się rzetelnością i wysokim poziomem merytorycznym. Uzyskane wyniki mają walor dużej praktycznej użyteczności. Zostały zredagowane w sposób przejrzysty i zachęcający do zajęcia się nakreślonymi przez Doktoranta nowymi celami badawczymi. Ma on **perspektywiczne miejsce** w budowie innowacyjnych rozwiązań projektowych i eksploatacyjnych mikrosieci z szerokim polem zapotrzebowania praktyki eksploatacyjnej, co skłania mnie do przypisania **rozprawie atrybutu pracy doktorskiej wyróżniającej**.

Ryszard Sokoł