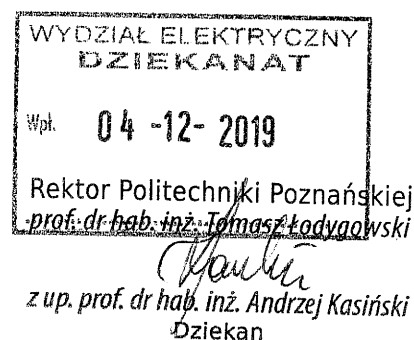


Opole, 30 listopada 2019

Prof. dr hab. inż. Tomasz BOCZAR
Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej
Katedra Odnawialnych Źródeł Energii



Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza JARMUDY
pt. „Optymalizacja struktury hybrydowego systemu zasilania
typu słoneczno-wiatrowego”

Podstawa formalna wykonania recenzji:

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana prof. dra hab. inż. Zbigniewa NADOLNEGO, zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej w Poznaniu, z 24 września 2019 r..

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Andrzej TOMCZEWSKI.

1. Ocena aktualności podjętej tematyki

W ostatnich 20 latach energetyka słoneczna i wiatrowa stanowią dwa najbardziej dynamicznie rozwijające się rodzaje odnawialnych źródeł, wykorzystywanych do produkcji energii elektrycznej. Już od kilku lat dynamika przyrostu nowych mocy wytwórczych zainstalowanych w elektrowniach wiatrowych i instalacjach fotowoltaicznych przewyższyła w krajach członkowskich Unii Europejskiej rozwój źródeł energii opartych na spalaniu nośników konwencjonalnych. Mając na uwadze obecne trendy rozwojowe eksperci International Renewable Energy Agency (IRENA) uważają, że już w 2020 r. energetyka wiatrowa i słoneczna będą produkowały w sumie podobną ilość energii co hydroenergetyka, a udział odnawialnych źródeł energii w bilansie energetycznym świata może przekroczyć poziom 12%. Natomiast, z raportu Instytutu Fraunhofer ISE zatytułowanego „*Current and Future Cost of Photovoltaics*” wynika, że w już 2025 roku fotowoltaika będzie najtańszym źródłem pozyskiwania energii elektrycznej, przy prognozowanym jednostkowym koszcie jej wytworzenia w krajach środkowej i południowej Europy ok. 4-6 eurocentów/kWh, a który dodatkowo według przyjętych założeń zmniejszy się do poziomu ok. 2-4 eurocentów/kWh w 2050 roku. Analogiczne tendencje dotyczące prognozowanego spadku cen energii elektrycznej produkowanej przez elektrownie wiatrowe typu on-shore zostały opublikowane w raporcie „*Renewable power generation costs in 2018*” przez IRENA. Rozwój energetyki słonecznej i elektrowni wiatrowych zauważalny jest również w Polsce, gdzie sumaryczna moc zainstalowana w systemie elektroenergetycznym, według URE na dzień 30 czerwca 2019 r., wyniosła ponad 5 881 MW w przypadku farm wiatrowych i ponad 259 MW dla instalacji fotowoltaicznych.

Obecnie prowadzone na świecie prace naukowe i badawczo-rozwojowe, dotyczące ogólnie rozumianej konwersji promieniowania słonecznego i energii kinetycznej wiatru na

energię elektryczną koncentrują się m.in. na: zwiększeniu efektywności energetycznej, zmniejszeniu kosztów samych instalacji oraz eksploatacyjnych, przy jednoczesnym wydłużeniu czasu ich pracy, a także eliminacji czynników zewnętrznych, które mogą mieć wpływ na sprawność przetwarzania. W celu zmniejszenia negatywnego wpływu stochastyczności zmian energii słonecznej i wiatrowej na wielkości wytwarzanej energii elektrycznej coraz większa liczba producentów oraz firm instalatorskich proponuje zastosowanie rozwiązań hybrydowych, przede wszystkim dedykowanych prosumentom i mniejszym odbiorcom. Odpowiednio dobrane struktury systemów złożonych z modułów fotowoltaicznych i turbin wiatrowych mogą znacząco ograniczyć przeciwstawne trendy deterministyczne zmian energii słońca i wiatru, jakie występują zarówno w okresie roku, jak również w czasie doby. Prowadzone w tym zakresie badania związane są z doбором optymalnych rozwiązań technicznych i parametrów instalacji hybrydowych, a także ich układów sterowania w celu zwiększenia efektywności ich pracy. Wykorzystywane są w tym celu narzędzia i metody modelowania matematycznego oraz numerycznego, a prowadzone prace naukowe koncentrują się na problematyce doskonalenia technik optymalizacyjnych.

Dlatego podjęta tematyka i założone cele rozprawy, które dotyczą doskonalenia technik wielowariantowej optymalizacji struktury hybrydowych układów zasilania, wykorzystujących odnawialne źródła energii słoneczno-wiatrowe dla potrzeb prosumentów, są aktualne i ważne pod względem merytorycznym. W mojej ocenie uzyskane w ramach realizacji rozprawy wyniki mają duże znaczenie naukowe i poznawcze, a także mogą znaleźć implementację techniczną w szeroko rozumianej energetyce odnawialnej. Należy również podkreślić, że otrzymane rezultaty, mogą zostać wykorzystane w procesie podejmowania decyzji inwestycyjnych, głównie przez osoby indywidualne i małe podmioty gospodarcze, w zakresie wykorzystania instalacji hybrydowych.

2. Charakterystyka rozprawy

Przedłożona rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza JARMUDY jest bardzo obszerna, ponieważ liczy aż 255 stron. Składa się z dziewięciu rozdziałów głównych obejmujących 172 strony zwartego tekstu, streszczeń w języku polskim i angielskim, spisu tabel i rysunków, wykazu słów kluczowych, załączników i wykorzystanych w pracy oznaczeń - bardzo użytecznego ze względu na ich dużą liczbę - a także spisu literatury zawierającego 221 pozycji. Przygotowany opis bibliograficzny został pogrupowany na pozycje książkowe (58 pozycji), artykuły naukowe i referaty konferencyjne (104 pozycje), dokumenty (29 pozycji), które zostały posortowane alfabetycznie. Ponadto zostało wykazanych 30 adresów stron internetowych. Należy zaznaczyć, że Doktorant jest autorem odpowiednio dwóch (pozycja 101 i 102) oraz współautorem kolejnych 7 z cytowanych pozycji literaturowych (pozycje 103-109), w tym jednego artykułu naukowego (miesięcznik naukowo-techniczny: Napędy i Sterowanie) i ośmiu referatów opublikowanych w recenzowanych materiałach pokonferencyjnych. W sposób pośredni świadczy to o wartości merytorycznej rezultatów uzyskanych w ramach realizacji recenzowanej dysertacji.

W mojej ocenie przegląd doniesień literaturowych, który jest bardzo obszerny, został przygotowany rzetelnie, jest wystarczający i zawiera wiele aktualnych pozycji obcojęzycznych zarówno z zakresu elektroenergetyki, a w szczególności dotyczących problematyki pozyskiwania energii słonecznej i wiatrowej, a także układów hybrydowych dla potrzeb produkcji energii elektrycznej, ale również związanych problematyką optymalizacji, modelowaniem matematycznym, z rachunkiem ekonomicznym i oceną opłacalności inwestycyjnej, a także z szeroko pojętą statystyką. Treść rozprawy została poszerzona o cztery załączniki, w których zostały w sposób usystematyzowany przedstawione wyniki

optymalizacji układu słoneczno-wiatrowego (Załącznik 1-3) oraz wydajności energetycznej badanych struktur dla trzech analizowanych wariantów (Załącznik 4).

Rozdział **pierwszy** składa się z trzech podrozdziałów, w których Doktorant przedstawił zagadnienia związane z ekologicznym i ekonomicznym aspektem wykorzystania odnawialnych źródeł energii (rozdz. 1.1), a także w oparciu o dokonany przegląd doniesień literaturowych scharakteryzował obecne możliwości oraz metody wykorzystywane w zakresie optymalizacji zagadnień związanych z szeroko rozumianym wytwarzaniem energii ze źródeł odnawialnych (rozdz. 1.2). Na tej podstawie uzasadnił aktualność podjętej w dysertacji tematyki, a także genezę wykonanych prac naukowo-badawczych.

Natomiast w rozdz. 1.3 zostały przedstawione podstawowe cele rozprawy, jej zakres i zadania szczegółowe, a przede wszystkim została założona następująca teza:

„... Zastosowanie odpowiednio opracowanych modeli turbiny wiatrowej i modułu fotowoltaicznego oraz zmodyfikowanej metody algorytmu genetycznego pozwala na wyznaczenie optymalnej, pod względem wykorzystania dostępnej energii pierwotnej wiatru i słońca, struktury hybrydowego systemu zasilania typu on-grid, pracującego w ustalonej lokalizacji geograficznej i przeznaczonego do współpracy z odbiornikiem o zadanym profilu obciążenia ...”.

W moim przekonaniu Doktorant prawidłowo i w sposób przemyślany sformułował tezę dysertacji, którą następnie konsekwentnie, w logicznym ciągu pracy, udowodnił.

Rozdział **drugi** ma charakter teoretyczny, w którym Doktorant w sposób ogólny opisał własności, zasoby energetyczne oraz scharakteryzował zagadnienia i zależności matematyczne związane z możliwościami pozyskiwania energii wiatru i słońca, dla potrzeb wytwarzania energii elektrycznej, zwracając uwagę na ich stochastyczny charakter. Ponadto, opisano stosowane obecnie metody pomiaru prędkości wiatru oraz natężenia promieniowania słonecznego, ze szczególnym uwzględnieniem urządzeń pomiarowych wykorzystanych przez Doktoranta dla potrzeb realizacji recenzowanej rozprawy. W tym zakresie zostały także zaprezentowane wyniki przeprowadzonej oceny niepewności danych pomiarowych oraz rezultaty analizy statystycznej pomiarów prędkości wiatru i odpowiednio irradiancji.

W rozdziale **trzecim** przedstawiono podstawowe zagadnienia teoretyczne dotyczące metod optymalizacji w zastosowaniu do szeroko rozumianych układów elektrycznych. W szczególności w sposób syntetyczny scharakteryzowano metody deterministyczne, stochastyczne oraz heurystyczne.

W rozdziale **czwartym** Doktorant w sposób ogólny opisał zasadę działania, charakterystyki, parametry techniczne i wielkości znamionowe, wybrane rozwiązania techniczne, a także podstawowe zależności opisujące pracę turbin wiatrowych oraz ogniw fotowoltaicznych. Natomiast w rozdziale 4.3 zdefiniowano pojęcie układów hybrydowych w kontekście energetyki, bazującej na źródłach odnawialnych oraz przedstawiono wybrane rozwiązania techniczne, pracujące zarówno autonomicznie (off-grid), jak również podłączonych do sieci elektroenergetycznej (on-grid).

Tematyka podjęta w rozdziale **piątym** dotyczy modelowania zagadnień energetycznych hybrydowego systemu zasilania typu słoneczno-wiatrowego, pracującego w układzie on-grid i pełniącego funkcję źródła energii elektrycznej dla odbiornika o znanej charakterystyce obciążenia, bez możliwości jej magazynowania. W szczególności opisano funkcjonalności poszczególnych modułów, wchodzących w skład struktury analizowanego systemu hybrydowego, którego schemat przedstawiono na rys. 76. W sposób syntetyczny scharakteryzowano wykorzystane dla potrzeb opracowania modeli matematycznych i numerycznych środowisko obliczeniowe Matlab i zastosowane toolboxy. Ponadto, opisano zastosowane modele matematyczne i numeryczne oddzielenie dla modułów fotowoltaicznych, turbin wiatrowych, falownika oraz hybrydowego systemu zasilania typu

słoneczno-wiatrowego. W części wynikowej zaprezentowano analizę porównawczą pod względem wielkości wytwarzanej energii i osiągniętej efektywności energetycznej dwóch zaproponowanych modeli numerycznych hybrydowego systemu zasilania typu słoneczno-wiatrowego, tj.: MATLAB + SIMULINK (model I) oraz MATLAB + C# (model II) dla dwóch przyjętych konfiguracji modułów PV i turbin wiatrowych (o mocy 1 kW i 100,3 kW). Podczas symulacji wykorzystano dwa profile obciążeń dla obiektów mieszkalnych i biurowych oraz wyniki pomiarów irradiancji i prędkości wiatru zarejestrowane w 2014 r. Jako wyniki zostały zaprezentowane wykresy ilustrujące sumaryczną wielkość wyprodukowanej energii w poszczególnych miesiącach, za pomocą modułów fotowoltaicznych i turbin wiatrowych, oddzielnie dla dwóch analizowanych mocy systemu hybrydowego. Dodatkowo zamieszczono charakterystyki ilustrujące wielkość wyprodukowanej energii elektrycznej z uwzględnieniem instalacji wiatrowej i solarnej oraz odpowiednio procentowy stopień pokrycia zapotrzebowania mocy dla dwóch analizowanych profili dobowego obciążenia. W celach porównawczych wykresy przedstawiono dla dwóch dni, jednego w okresie zimy i jednego w lecie, oddzielenie dla dwóch analizowanych mocy systemu hybrydowego. W podsumowaniu tego rozdziału zamieszczono tabelę zawierającą zestawienie porównawcze wyznaczonych wartości wielkości wyprodukowanej energii elektrycznej w ujęciu rocznym, uzyskanych wydajności energetycznych modułów fotowoltaicznych i turbin wiatrowych oraz czasu wykonywania obliczeń dla rozpatrywanych układów oraz analizowanych modeli. Na tej podstawie zostały sformułowane wnioski dotyczące stopnia pokrycia zapotrzebowania energetycznego rozpatrywanych odbiorców przez zaproponowany hybrydowy system zasilania, a także dokonano oceny dokładności i czasu obliczeń, a także ich przydatności dla potrzeb realizacji zagadnień optymalizacyjnych. W konsekwencji dokonanych obliczeń i analiza porównawczych został wybrany przez Doktoranta model wykorzystujący technologię łączoną Matlab + C# (model II).

W rozdziale *szóstym* przedstawiono ekonomiczne aspekty związane z wytwarzaniem energii elektrycznej przez odnawialne źródła energii, ze szczególnym uwzględnieniem hybrydowych systemów generacyjnych. W tym zakresie Doktorant dokonał przeglądu metod dynamicznych i wskaźników finansowych wykorzystywanych do oceny efektywności ekonomicznej inwestycji rzeczowych. W szczególności opisał metodę uśrednionego jednostkowego kosztu wytwarzania energii (LCOE), za pomocą której można wyznaczyć wartość minimalną ceny energii elektrycznej równoważącą koszty jej wytworzenia w rozpatrywanym źródle, dla której suma zdyskontowanych zysków jest równa sumie zdyskontowanych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Ponadto, zaproponował model ekonomiczny rozpatrywanego systemu słoneczno-wiatrowego, który w analizach finansowych uwzględnia zarówno koszty inwestycyjne ponoszone na etapie budowy, jak również eksploatacyjne wynikające z jego użytkowania w czasie. Dodatkowo, w sposób syntetyczny zostały scharakteryzowane, najistotniejsze z punktu widzenia prosumentów, obowiązujące w Polsce przepisy prawne dotyczące wytwarzania energii elektrycznej w instalacjach wykorzystujących odnawialne źródła energii.

W rozdziale *siódmym* Doktorant przedstawił cel, zakres, kryteria i sposób przeprowadzenia optymalizacji struktury zaproponowanego układu hybrydowego słoneczno-wiatrowego typu on-grid. W oparciu o przyjęte kryteria zostały określone trzy typy zadań optymalizacyjnych, dla których zdefiniowano funkcje celu. Przy czym, optymalizacja dotyczyła trzech aspektów, tj.: maksymalizacji wydajności energetycznej, minimalizacji jednostkowego kosztu wytworzenia energii elektrycznej oraz minimalizacji ilości energii elektrycznej kupowanej z sieci elektroenergetycznej w okresie jednego roku kalendarzowego. Na podstawie analizy struktury fizycznej oraz założonych funkcjonalności rozpatrywanej instalacji słoneczno-wiatrowej zdefiniowano postać wektora zmiennych decyzyjnych dla trzech zadań optymalizacyjnych oraz wyznaczono znormalizowaną postać zbioru ograniczeń

strukturalnych i funkcjonalnych. W rozdz. 7.3 uzasadniono wybór zastosowanej metody optymalizacyjnej bazującej na zmodyfikowanym przez Doktoranta algorytmie genetycznym, którego charakterystyka została przedstawiona w rozdz. 7.4, a sposób jego implementacji w środowisku Matlab i Visual Studio (język C#) w rozdz. 7.5.

W rozdziale *ósmym* zostały zamieszczone, reprezentatywne z punktu widzenia poznawczego, rezultaty przeprowadzonych obliczeń optymalizacyjnych, oddzielnie dla trzech zdefiniowanych zadań. Przy czym, uzyskane wyniki i zależności zostały każdorazowo w sposób szczegółowy przeanalizowane.

W rozdz. 8.2 zostały zaprezentowane otrzymane rezultaty optymalizacji pod kątem maksymalizacji wydajności energetycznej. W postaci charakterystyk zilustrowano zależności wyznaczonych wartości wydajności energetycznej od wielu czynników, takich jak: numer pokolenia, efektywność on-line, udział mocy części słonecznej i wiatrowej instalacji, itd. Przedstawiono także przebiegi wartości energii elektrycznej wytwarzanej w zoptymalizowanym systemie hybrydowym, z uwzględnieniem udziału mocy modułów fotowoltaicznych i turbin wiatrowych oraz wielkości produkowanej energii. Uzupełnienie uzyskanych rezultatów stanowi Załącznik 1, w którym przedstawiono w formie tabelarycznej, zestawienie założonych do obliczeń mocy oraz konfiguracji sekcji słonecznej i wiatrowej, a także wyznaczonych wartości parametrów charakteryzujących wydajność energetyczną, oddzielnie dla dwunastu analizowanych przypadków optymalizacji.

W rozdz. 8.3 Doktorant przedstawił wybrane wyniki optymalizacji minimalizacji kosztu wytworzenia energii elektrycznej, przeprowadzonych przy wykorzystaniu metody LCOE. W tym zakresie zostały zaprezentowane wykresy ilustrujące zależność zmian wartości kosztu LCOE w funkcji numeru pokolenia, efektywności on-line, udziału mocy modułów PV i turbin wiatrowych dla jedenastu rozpatrywanych wariantów. Dodatkowo, przedstawiono charakterystyki wielkości produkowanej energii oraz jej podział w zoptymalizowanym systemie w funkcji udziału mocy modułów solarnych i turbin wiatrowych.

Natomiast szczegółowe zestawienie otrzymanych rezultatów optymalizacji pod kątem minimalizacji kosztów wytworzenia energii elektrycznej w zaproponowanym układzie hybrydowym zawiera Załącznik 2, w którym w ujęciu tabelarycznym przedstawiono wyniki uzyskane dla dwunastu analizowanych przypadków.

W rozdz. 8.4 zostały przedstawione wybrane i reprezentatywne wyniki obliczeń optymalizacyjnych uzyskanych w procesie minimalizacji ilości energii elektrycznej, jaką należy zakupić, aby zapewnić niezawodne zasilanie rozpatrywanych obiektów. W szczególności zostały zamieszczone charakterystyki, na których zilustrowano zmiany funkcji przystosowania w zależności od numeru pokolenia i efektywności on-line, oddzielnie dla rozpatrywanych przypadków. Przy czym, zamieszczone wyniki uwzględniają wpływ udziału mocy sekcji słonecznej i wiatrowej w mocy całkowitej układu hybrydowego. Ponadto, na kolejnych wykresach przedstawiono zestawienie porównawcze kosztu LCOE oraz kosztu energii wytworzonej w układzie hybrydowym i zużytej dla potrzeb zasilania rozpatrywanych obiektów w funkcji udziału mocy modułów fotowoltaicznych i turbin wiatrowych. Dodatkowo, przedstawiono zależności ilości zakupionej energii elektrycznej w celu zapewnienia ciągłości zasilania analizowanych obiektów od udziału mocy modułów PV i turbin wiatrowych, osobno dla rozpatrywanych wariantów. Zamieszczono także charakterystyki ilustrujące ilość energii elektrycznej, wyprodukowanej w zoptymalizowanym systemie hybrydowym w funkcji udziału mocy ogniw fotowoltaicznych i instalacji wiatrowych oraz dobowe przebiegi wielkości mocy generowanej w modułach fotowoltaicznych i turbinach wiatrowych, pobranej z sieci zasilającej w zestawieniu z profilami rozpatrywanych odbiorników dla nieoptymalizowanych i zoptymalizowanych układów hybrydowych. Natomiast, w Załączniku 3 przedstawiono, w sposób analogiczny jak w Załączniku 1 i 2, zestawienie wyników optymalizacji wykonanej pod kątem minimalizacji

ilości energii elektrycznej, jaką należy zakupić od dostawcy w celu zagwarantowania ciągłości zasilania rozpatrywanych odbiorników o znanych profilach obciążenia.

W kolejnych trzech podrozdziałach rozdz. 8.5 przedstawiono szczegółowe omówienie uzyskanych wyników i wyznaczonych zależności, a na ich podstawie sformułowano wnioski, oddzielenie dla każdego z trzech zadań optymalizacyjnych.

Ogólne podsumowanie przeprowadzonych prac, które zostały zrealizowane w ramach recenzowanej rozprawy doktorskiej, zostało przedstawione w rozdziale *dziewiątym*. W rozdziale tym Doktorant na podstawie uzyskanych i zaprezentowanych w rozprawie rezultatów sformułował szereg wniosków zarówno o charakterze ogólnym, jak również szczegółowym, które w sposób jednoznaczny potwierdzają założoną tezę. Ponadto, w sposób syntetyczny zostały wyszczególnione najważniejsze osiągnięcia Doktoranta o charakterze naukowym i poznawczym, a także wskazane propozycje dotyczące możliwych, przyszłych kierunków prowadzenia prac naukowo-badawczych w podjętej tematyce.

Reasumując, zaproponowany układ pracy jest czytelny, kolejne rozdziały tworzą logiczną oraz zamkniętą całość, a podjęte w rozprawie zagadnienia zostały sprecyzowane jednoznacznie i w mojej ocenie mają rangę naukową odpowiadającą rozprawom doktorskim.

3. Główne osiągnięcia rozprawy

Za najważniejsze osiągnięcia o charakterze naukowym, poznawczym i implementacyjnym Doktoranta uważam:

- dokonanie syntetycznej oceny aktualnego stanu wiedzy dotyczącej poruszanej w rozprawie tematyki na podstawie przeglądu doniesień literaturowych, głównie w oparciu o publikacje zagraniczne;
- przeprowadzenie analiz i wizualizacji graficznej danych pomiarowych prędkości wiatru oraz stopnia nasłonecznienia pozyskanych dla jednej lokalizacji dla okresu dwóch lat 2011-2012, przy wykorzystaniu podstawowych narzędzi statystycznych;
- zaproponowanie dwóch modeli numerycznych systemu hybrydowego wytwarzania energii elektrycznej wykorzystującego panele fotowoltaiczne i turbiny wiatrowe przy zastosowaniu środowiska programistycznego Matlab & Simulink oraz technologii łączonej Matlab i C# i przeprowadzenie symulacji jego pracy dla zarejestrowanych danych pomiarowych w celu potwierdzenie ich przydatności w procesach optymalizacyjnych;
- zaproponowanie, w oparciu o przeprowadzony przegląd doniesień literaturowych, modelu ekonomicznego dla rozpatrywanego systemu hybrydowego, uwzględniającego koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, który został wykorzystany w procesie optymalizacji;
- opracowanie autorskiego algorytmu optymalizacji struktury hybrydowego systemu słoneczno-wiatrowego, włączonego do sieci elektroenergetycznej i przeznaczonego do zasilania dwóch typów obiektów o znanych charakterystykach obciążenia oraz jego zaimplementowanie w środowisku programistycznym Matlab i Visual Studio, a także zaproponowanie trzech funkcji celu o charakterze technicznym i ekonomiczno-technicznym oraz zbioru ograniczeń;
- przeprowadzenie wielowariantowych optymalizacji struktury zaproponowanego układu hybrydowego typu słoneczno-wiatrowego, z wykorzystaniem różnych funkcji celu, konfiguracji, wartości i udziale mocy, pod względem: maksymalizacji wydajności energetycznej, minimalizacji jednostkowego kosztu wytworzenia energii elektrycznej LCOE (ang. Levelized Cost of Electricity) oraz minimalizacji ilości

energii elektrycznej, jaką należy zakupić w okresie jednego roku, aby zapewnić ciągłość zasilania obiektu mieszkalnego i biurowego o znanych profilach dobowego obciążenia;

- wskazanie wytycznych dla potrzeb projektowania hybrydowych systemów generacyjnych typu słoneczno-wiatrowego na podstawie analizy uzyskanych wyników w ramach realizacji rozprawy doktorskiej.

W moim przekonaniu, przedstawione wyżej osiągnięcia Doktoranta uzasadniają jego kompetencje naukowe i rekomendują Go do stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika.

4. Uwagi do rozprawy

Uwagi i zastrzeżenia dotyczące ocenianej rozprawy podzieliłem na cztery podstawowe grupy:

- ogólne uwagi merytoryczne (11),
- szczegółowe uwagi merytoryczne (16),
- uwagi redakcyjne.

4.1 Ogólne uwagi merytoryczne

1. W rozdz. 2 dysertacji Doktorant stwierdził, że „... *W energetyce wiatrowej ważnym zagadnieniem jest uśrednianie prędkości wiatru tzn. średnia wartość z pomiarów prędkości wiatru przeprowadzonych w określonym okresie czasowym. Standardowe czasy uśredniania to 10 minut lub 1 godzina. Zdaniem Autora, stosowanie tak dużych czasów nie pozwala na prawidłowy dobór turbin wiatrowych do lokalizacji geograficznej oraz charakteru obciążenia w systemach off-grid [20] ...*”, przy czym powołuje się na książkę prof. Z. Lubośnego pt.: *Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym*. Proszę o szerszy komentarz w tym zakresie. Ponadto, jakie wartości czasów uśredniania prędkości wiatru zdaniem Doktoranta są najwłaściwsze i dlaczego? Czy przyjęte podczas pomiarów wartości okresu uśredniania $\Delta t = 47$ s dla prędkości wiatru i odpowiednio $\Delta t = 36$ s dla irradancji są zatem optymalne?

2. W rozdz. 4.1, w którym zostały w sposób syntetyczny scharakteryzowane turbiny wiatrowe, brakuje akapitu dotyczącego osiąganych sprawności konwersji przetwarzania energii kinetycznej wiatru na energię elektryczną, analogicznie jak to zostało przedstawione w rozdz. 4.2 w przypadku ogniw fotowoltaicznych. Proszę o komentarz w tym zakresie, jak również o uzupełnienie informacji dotyczących osiąganych obecnie sprawności w przypadku najnowszych rozwiązań w zakresie modułów solarnych.

3. Jak Doktorant ocenia możliwość zastosowania metody Monte Carlo w celu prognozowania wyniku finansowego systemów hybrydowych bazujących na odnawialnych źródłach energii?

4. Prosiłbym o dokonanie analizy porównawczej uzyskanych przez Doktoranta rezultatów w ramach rozprawy z modelem ekonomicznym opracowanym w ramach pracy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Radziejewicza pt. „*Modelowanie elektrowni wiatrowej w systemie elektroenergetycznym w otoczeniu rynkowym*” obronioną na Politechnice Opolskiej w 2009 r., której promotorem był prof. dr hab. inż. Gerhard Bartodziej. Jak ocenia Pan przydatność zaproponowanych tam rozwiązań do modelu ekonomicznego systemu hybrydowego?

5. Prosiłbym o jednoznaczne wskazanie wkładu własnego Doktoranta w opracowanie systemu informatycznego wykorzystującego, zaproponowany dla potrzeb optymalizacji struktury hybrydowego systemu słoneczno-wiatrowego, algorytm genetyczny,

który scharakteryzowano w rozdz. 7.5, cytując przy tym pozycję [49], której autorem jest promotor rozprawy.

6. Doktorant w dysertacji wykorzystuje narzędzia analizy statystycznej, natomiast komentując uzyskane wyniki optymalizacyjne w rozdz. 8.5.3 napisał, że: „... *jest niekorzystna korelacja pomiędzy produkcją energii elektrycznej (w godzinach dziennych) i zapotrzebowaniem na nią (w godzinach wieczornych) ...*”. Mając powyższe stwierdzenie na uwadze mam pytanie - czy w celu określenia zależności korelacyjnych zostały zastosowane metody wnioskowania statystycznego oparte na testach istotności ?

7. Doktorant na podstawie zilustrowanych wyników przeprowadzonej optymalizacji w rozdz. 8.5, dysertacji stwierdza, m.in., że: „... *charakter zmian podziału energii elektrycznej wytwarzanej w sekcji wiatrowej i słonecznej jest nieliniowy, zbliżony do wykładniczego ...*” oraz „... *charakter zmian ilości energii elektrycznej produkowanej w układzie w funkcji udziału mocy sekcji słonecznej jest zbliżony do liniowego ...*” a także „... *niepełnym dopasowaniem profilu generacyjnego układu do profilu obciążenia ...*” czy „... *może w powodować stopień dopasowania profilu generacyjnego układu do profilu obciążenia ...*”, co ma charakter oceny jakościowej. Czy została w tym zakresie wykonana ocena ilościowa, na przykład poprzez obliczenie wartości współczynnika determinacji R^2 ?

8. W rozdz. 9 stanowiącym podsumowanie zrealizowanych prac Doktorant stwierdził, że: „... *ustalenie liczby osobników i pokoleń algorytmu, wymaganej liczby jego uruchomień wymaganej liczby jego uruchomień (testy powtarzalności wyników) ...*” (str. 180) oraz „... *pozwala uzyskiwać dobrą zbieżność obliczeń oraz dużą powtarzalność wyników ...*” (str. 181). Czy w związku z powyższym, w celu określenia powtarzalności uzyskiwanych zależności zostały zastosowane metody wnioskowania statystycznego oparte na testach istotności ?

9. Proszę o określenie kierunków i zakresu możliwości wykorzystania uzyskanych w ramach realizacji rozprawy wyników w praktyce projektowej czy inwestycyjnej.

10. Praktycznie wszystkie cytowane dane o charakterze statystycznym dotyczące energetyki wiatrowej i słonecznej są najczęściej nieaktualne, dotyczy to także rysunków. Lepiej byłoby zacytować dane przedstawiając tendencje aby pokazać zmiany następujące w kolejnych latach/dziesięcioleciach, co byłoby bardziej interesujące z poznawczego punktu widzenia.

11. Mając na uwadze m.in. sformułowanie Doktoranta: „... *w celu uzyskania największej zgodności między histogramami, a rozkładami normalnymi ...*”, czy i jakie metody analiz statystycznych wykorzystujące testy istotności zostały zastosowane w celu określenia normalności rozkładów ? Jak należy rozumieć optymalny rozkład normalny ?

4.2 Szczegółowe uwagi merytoryczne

1. Doktorant posługuje się nieprecyzyjnym sformułowaniem: minimalizacja energii elektrycznej kupowanej z sieci elektroenergetycznej (np. w przypadku tytułu rozdz. 8.4), ponieważ energii elektrycznej nie kupuje się z sieci elektroenergetycznej, ale się przesyła. Energię kupuje się od podmiotów gospodarczych np. spółek dystrybucyjnych na podstawie podpisanych umów sprzedaży między dostawą a odbiorcą. Poprawnie powinno być zakup energii niezbędnej do zasilania rozpatrywanych odbiorników.

2. Na str. 88 dysertacji Doktorant napisał: „... *Zgodnie z opisem z rozdziałów 5.4 i 5.5 w środowisku MATLAB opracowano dwa numeryczne modele hybrydowego systemu zasilania typu słoneczno-wiatrowego: MATLAB + SIMULINK (model I) oraz MATLAB + C# (model II)...*”. Przy czym, w rozdziale 5.5 brak jest informacji o zastosowaniu takich modeli. W związku z powyższym proszę o komentarz w tym zakresie.

3. Doktorant w rozdz. 2.1.2 podaje przykładowe charakterystyki (rys. 2.3) zmian prędkości wiatru na podstawie [199], natomiast dostępne są nowsze i bardziej kompletne dane wyznaczone dla obszaru Polski np. przez IMiGW.

4. Na rys. 2.4 (str. 32) zilustrowano średnie roczne: a) usłonecznienie w Polsce w latach 1971-2000, b) nasłonecznienie w Polsce w latach 2004-2010 na podstawie cytowania [209]. Natomiast dostępne są nowsze mapy opracowane w ramach funduszy UE i dostępne w Internecie.

5. Brak cytowań w wzorach: (2.2 -2.4; 3.1; 3.4; 4.6).

6. Brak cytowań pod rys. 4.2 (str. 63).

7. Brak adekwatnego cytowania do akapitu na str. 25, w którym Doktorant charakteryzuje zmienność prędkości średniej wiatru na obszarze Polski.

8. Brak adekwatnego cytowania do akapitu na str. 29, w którym Doktorant opisuje podstawowe parametry opisujące ilościowo dostarczana do Ziemi energię promieniowania słonecznego.

9. Brak adekwatnego cytowania do akapitu na str. 53, w opisie pod zależnością 3.3.

10. Brak w wykazie skrótów i oznaczeń: PV; OZE.

11. Na str. 28 znajduje się powtórzone zdanie dotyczące anemometru mechanicznego.

12. Na str. 74 znajduje się zapis „... (FALOWNIK WIATROWY), gdzie następuje zamiana prądu stałego na zmienny, ...”, natomiast poprawnie powinno być prąd przemienny.

13. Nieaktualne dane w tabeli 4.1 (str. 62) z 2015 r., które uległy zmianie i są dostępne w co roku sporządzanych raportach np. przez European Wind Energy Association.

14. Proszę określić, jaką metodę zastosowano do aproksymacji profili obciążenia dla budynku mieszkalnego i biurowego, które zostały pozyskane przez Doktoranta od firmy ENERGA (str. 75) ?

15. W rozdziale 5.6 Doktorant zaprezentował uproszczony model falownika dla sekcji słonecznej, proszę o komentarz, dotyczący modelowania falownika w sekcji wiatrowej i sieciowego.

16. Doktorant w rozdziale 4.1 scharakteryzował turbiny wiatrowe małych mocy typu HAWT i VAWT, prosiłbym o przedstawienie krzywej mocy dla analizowanej w rozdz. 8.8 turbiny Aircon10 o mocy znamionowej 9,8 kW.

4.3 Uwagi redakcyjne

Moim zadaniem rozprawa została zredagowana bardzo dobrze i pomimo swojej obszerności (255 stron), zawiera tylko nieliczne, błędy redakcyjne, interpunkcyjne, niezręczności językowe, czy sformułowania nietechniczne, które zaznaczyłem bezpośrednio w tekście dysertacji. Przy czym należy podkreślić, że nie wpływają one na moją pozytywną ocenę merytoryczną recenzowanej dysertacji. Poniżej przedstawiłem kilka przykładów dostrzeżonych przeze mnie omyłek językowych:

- Doktorant posługuje się w pracy językiem technicznym, jednak nie ustrzegł się przed zastosowaniem w kilku miejscach mało precyzyjnych zwrotów i sformułowań np.:
 - „... *Dobre rezultaty* ...” (str. 22); „... *nie wpisuje się dobrze* ...” (str. 25); „... *mechanizmów obróbki szeregów czasowych* ...”(str. 25); „... *o solidnej konstrukcji* ...” (str. 36); „... *małych wartościach* ...” (str. 36); „... *na dobrą jakość pomiarów* ...” (str. 38); „... *jest jej znikoma ilość* ...” (str. 51); „...*charakterystyki ładowane są* ...” (str. 121), itd.

- W dysertacji dostrzegłem tylko kilka powtórzeń wyrazu w zdaniach, które można było w prosty sposób wyeliminować, np.: „...do zawartości baz danych, zawierających...” (str. 58), „... prosumentów wykorzystuje opusty, czyli bezgotówkowe rozliczenia energii elektrycznej pobranej przez prosumenta ...” (str. 106), „... postać funkcji celu, niejawne występowanie w funkcji celu ...” (str. 116), itd.
- Przykłady sformułowań niepoprawnych stylistycznie i niezręczności językowych: „... Metody pomiaru irradiancji na cele energetyki odnawialnej ...” (str. 33); „... pokazano lokalizację w stacji transferu...” (str. 34); „... ciekawy jest rok 2013 ...” (str. 51), „...energia elektryczna przepada ...” (str. 106); itd.
- Błąd literowy: jest: „... w ramach opustu ...”, a poprawnie powinno być: „... w ramach upustu ...” (str. 106);
- W kilku przypadkach Doktorant posługuje się formą osobową, zamiast bezosobowo, jak ma to miejsce w tekstach technicznych, dla przykładu: „które klasyfikujemy” (str. 60); „im później ponosimy” (str. 101); „mówi nam” (str. 101); „wyboru musimy” (str. 101), itd.
- Brak konsekwencji w stosowaniu skrótu OZE, np.: str. 11, 12, 13, 16, 104, 105, itd.
- Można było wprowadzić powszechnie wykorzystywany w tekstach technicznych skrót Rys. w miejsce Rysunek.
- Nie wprowadzono skrótu PV, WMO, el-en i UE.

Istnieje obiektywna trudność w jednoznacznej interpretacji poszczególnych przebiegów zilustrowanych na rys. 8.1 – 8.12 w rozdz. 8.2, oraz na rys. 8.48 – 8.57 w rozdz. 8.3, a także na rys. 8.93-8.102 w rozdz. 8.4 ze względu mały rozmiar wykresów, zbliżona kolorystykę i dużą liczbę przedstawianych zależności (12 przebiegów), pomimo zastosowania różnych sposobów formatowania linii.

Podsumowując, zawarte w recenzji uwagi i zastrzeżenia merytoryczne i redakcyjne, nie wpływają w sposób znaczący na wartość merytoryczną rozprawy, proszę jednak Doktoranta o odniesienie się do nich przed obroną. W związku z powyższym recenzowana praca nie wymaga zmian ani uzupełnień.

5. Wniosek końcowy

Oceniana rozprawa doktorska dotyczy aktualnego i oryginalnego zagadnienia naukowego o zaznaczonym charakterze implementacyjnym. Należy do prac doskonalących metody optymalizacji aspektów techniczno-ekonomicznych wytwarzania energii elektrycznej w hybrydowych układach typu słoneczno-wiatrowego.

Uzyskane wyniki mają duże znaczenie poznawcze i naukowe, a także możliwości praktycznego zastosowania uzyskanych zależności przy określaniu opłacalności ekonomicznej oraz wspomagających procesy decyzyjne, związane z inwestycjami w szczególności prowadzonymi przez prosumentów w sektorze energetyki słonecznej i wiatrowej, przede wszystkim w zakresie mikro i małych instalacji.

Główne cele rozprawy były konsekwentnie realizowane i w mojej ocenie zostały osiągnięte. Doktorant wykazał się zdolnością samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów o charakterze naukowym, dobrym opanowaniem wiedzy teoretycznej z zakresu szeroko rozumianej energetyki solarnej, a w szczególności fotowoltaiki, energetyki wiatrowej, metod i algorytmów optymalizacji, modelowania matematycznego, analizy statystycznej i ekonomicznej, a także umiejętnością programowania w środowisku Microsoft Visual Studio C# oraz praktycznego wykorzystania nowoczesnych narzędzi obliczeniowych tj. środowiska Matlab&SIMULINK i Statistica.

Uważam, że przedłożona praca spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, określone w obowiązującej *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki*. Dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie przez Radę Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej w Poznaniu, mgra inż. Tomasza JARMUDĘ do publicznej obrony przedłożonej rozprawy.

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'Z' followed by a horizontal line and a small flourish.