

Dr hab. inż. Maciej Neugebauer, prof. UWM
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Wydział Nauk Technicznych
Katedra Elektrotechniki i Energetyki
Ul. Oczapowskiego 11
10-719 Olsztyn

Olsztyn 15.01.2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana mgr inż. Piotra Łyszczarza
pt. **Modelowanie efektywności energetycznej nadążnych układów fotowoltaicznych**
Promotor rozprawy doktorskiej: **dr hab. inż. Jarosław Knaga, prof. URK**
Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej: **dr inż. Marcin Tomasik**

Na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki.

1. Przedmiot recenzji

Recenzowana jest rozprawa doktorska Piotra Łyszczarza, o łącznej objętości 129 stron, w tym strona tytułowa, streszczenie w języku polskim i angielskim, 3 strony najważniejszych skrótów i oznaczeń, 2 strony spisu treści, 97 stron właściwej pracy, 15 stron bibliografii (157 pozycje), dodatkowe 5 stron zajmuje wykaz rysunków, fotografii i tabel oraz dwa załączniki na 4 stronach – potwierdzające złożenie wniosków patentowych opracowanych na podstawie prac i badań związanych z realizacją pracy doktorskiej.

Recenzowana rozprawa składa się z 9 głównych rozdziałów. Z punktu widzenia merytorycznego, najważniejsze w recenzowanej pracy są rozdział 6 w którym Doktorant opisał przedmiot i metodykę badań oraz rozdział 7 w którym opisane są uzyskane wyniki badań oraz ich analiza.

Praca napisana jest na zadowalającym poziomie językowym z widocznymi pewnymi błędami stylistycznymi i interpunkcyjnymi, które bardziej szczegółowo zostały wypisane w punkcie 4.2 niniejszej recenzji. Strona graficzna pracy jest prawidłowa, obejmuje liczne rysunki, fotografie, wzory, tabele i wykresy, które w sposób wyraźny podnoszą poziom poznawczy pracy, sprawiając, że pracę czyta się z ciekawością i zrozumieniem wywodów które Doktorant przedstawiał w pracy.

2. Tematyka rozprawy

W dobie kryzysu energetycznego i klimatycznego oraz wynikającej z nich transformacji energetycznej systemów produkcji energii na świecie i w Polsce – podjęta przez Autora tematyka dotycząca modelowania efektywności energetycznej nadążnych układów PV jest bardzo ważna. Zwiększenie wydajności produkcji energii w systemach PV może być realizowane dwojako. Pierwszym ze sposobów jest poprawa samej sprawności konwersji energii promieniowania na energię elektryczną w panelach PV. Pojawiają się nowe generacji paneli PV o coraz wyższych sprawnościach. Drugim jest zastosowanie układów nadążnych współpracujących z panelami PV. Właściwe położenie paneli PV względem słońca (w zależności od sytuacji meteorologicznej, uwzględniające zarówno promieniowanie słoneczne skupione jak i rozproszone) może zwiększyć produkcję energii elektrycznej. Jednak, żeby układy nadążne pracowały poprawnie muszą być sterowane w sposób uwzględniający również chwilowe warunki lokalne. Zależnie od stopnia zachmurzenia, pory dnia itp., optymalne położenie paneli PV tj. zwiększające efektywność produkcji energii w porównaniu do paneli statycznych wymaga opracowania algorytmów sterowania układami trackerów i ewentualnie specjalnych czujników kierunku i intensywności promieniowania słonecznego. Algorytm sterowania działaniem układu nadążnego jest zależny od typu wykorzystywanych czujników, ich zasady działania i generowanego sygnału. Czyli te dwa elementy układu nadążnego powinny być opracowywane razem.

Tym właśnie aspektem zajął się Doktorant w swojej rozprawie. W trakcie prowadzonych prac badawczych, Autor w ramach realizacji pracy doktorskiej opracował nowy rodzaj czujnika położenia kierunku promieniowania oraz zgodny z nim algorytm sterowania. Do tego opracował układ elektromechaniczny realizujący zmianę położenia paneli. Następnie Doktorant przeprowadził badania in situ porównując pracę nieruchomego i nadążnego układu wykorzystującego opracowany czujnik, algorytm, układ sterowania i pozycjonowania. Dodatkowo, Autor opracowała układ pomiarowy, rejestrujący parametry pracy obydwu paneli PV oraz energię zużywaną przez układ pomiarowo-sterujący systemu nadążnego.

Uzyskane dane pozwoliły Doktorantowi na przeprowadzanie szeregu analiz umożliwiających weryfikację postawionych hipotez roboczych. Napisana praca i poruszane w niej zagadnienia są zgodne z obecnymi trendami i priorytetami dotyczącymi zwiększeniem efektywności energetycznej źródeł OZE, a w tym również farm fotowoltaicznych.

3. Merytoryczna ocena pracy

Pierwszą częścią rozprawy doktorskiej jest przegląd literatury, w której Autor poruszył różne zagadnienia – od charakterystyki sektora paliw i energii w tym również dotyczących kopalnych źródeł

energii po różne rozwiązania pracy systemów PV. Ta część pracy obejmuje 15 stron tekstu. W rozdziale 2.2 Doktorant opisał podstawowe cechy układów nadążnych dla systemów PV. W kolejnych dwóch rozdziałach (3 i 4) zostały opisane na podstawie przeglądu literatury obecnie budowane, używane i testowane czujniki kierunku promieniowania słonecznego oraz układów sterowania pracą systemów nadążnych. Wykonany przegląd literatury pozwolił Doktorantowi na sformułowanie trzech hipotez roboczych pracy. Ta część pracy obejmuje 23 strony. Na podstawie sformułowanych hipotez, Doktorant określił cel i zakres pracy – opisane w rozdziale 5 rozprawy.

W rozdziale 6 pracy Autor szczegółowo opisał przedmiot badań, to jest zaproponowaną konstrukcję czujnika kierunku maksymalnego promieniowania. Podane zostały zarówno dane wykonawcze jak i opis parametrów wykorzystanych elementów, schematy połączeń, ich rozmieszczenia itp. dane konstrukcyjne. W dalszej części rozdziału 6 opisano układ sterowania, wraz z zaproponowanym algorytmem jego pracy i schematem blokowym wykonanego programu dla zastosowanego sterownika PLC. Opisano również sam układ akwizycji danych dla zbudowanego stanowiska badawczego na potrzeby realizacji pracy doktorskiej oraz szczegółowy algorytm realizacji badań empirycznych. Ta część pracy obejmuje 11 stron.

Na kolejnych 6 stronach – Doktorant opisał szczegółowo zależności teoretyczne wynikające z projektu czujnika kierunku projektowania i na tej podstawie opisał czułość czujnika i wynikające z niej błędy nieliniowości charakterystyki czujnika. W dalszej części rozprawy, Autor opisał wyprowadzenie wzoru pozwalającego obliczyć potrzebną minimalną powierzchnię paneli PV, która będzie generowała energię zużywaną jedynie na potrzeby pracy układu sterowania. Ta część zajmuje 4 strony.

Kolejnych 26 stron stanowi rozdział 7 – obejmujący opis uzyskanych wyników oraz empiryczną weryfikację poprawności działania zbudowanych czujnika, układu sterowania i działania algorytmu sterującego jego pracą. W tej części Doktorant opisał również wykonaną na podstawie badań analizę efektywności energetycznej zaproponowanego rozwiązania układu nadążnego PV. Na 28 wykresach Doktorant zobrazował uzyskane wyniki badań, które znacząco ułatwiają zrozumienie narracji tekstu.

Rozdział 8 stanowi dyskusja uzyskanych wyników wraz z odniesieniem do wyników z literatury – obrazujących osiągnięte rezultaty i korzyści proponowanej konstrukcji czujnika i układu sterowania pracą trackera w odniesieniu do innych opisanych w literaturze rozwiązań układów nadążnych instalacji PV. Rozdział ten obejmuje nieco ponad 3 strony tekstu.

W rozdziale 9 – Doktorant sformułował 8 syntetycznych, poprawnych i wynikających z uzyskanych wyników wniosków wraz z miarami ilościowymi – w sposób jednoznaczny potwierdzający sformułowane hipotezy badawcze i jednocześnie potwierdzających rozwiązanie postawionego problemu badawczego, naukowego i poznawczego.

Rozprawa napisana jest poprawnym językiem, bez nadmiernego komplikowania, co sprawia że czyta się ją z przyjemnością, podążając za wywodami autora. Jednocześnie całość pracy napisana jest prawidłowym językiem technicznym.

Całość rozprawy doktorskiej opisana wyżej pozwala jednoznacznie stwierdzić, że Doktorant – Pan Piotr Łyszczarz posiada ogólną wiedzę teoretyczną wymaganą od osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna oraz wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

4. Uwagi szczegółowe

4.1. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Na wstępie należy zwrócić uwagę na nie do końca poprawnie sformułowany tytuł rozprawy – nie odpowiadający do końca treści rozprawy. Tytuł brzmi „Modelowanie efektywności energetycznej nadążnych układów fotowoltaicznych”. Tak sformułowany tytuł wymagałby budowy modelu (modeli) zależności energii produkowanej w układach nadążnych do energii potrzebnej do ich ustawiania z uwzględnieniem energii zużywanej w układach mechanicznych, napędowych itp. Autor wyprowadził wzór na minimalne pole modułu potrzebne do zasilania układu sterowania oraz przeprowadził badania i modelowanie instalacji testowej wraz z wyznaczeniem warunków granicznych i wartości poszczególnych współczynników. Opisał teoretycznie i zweryfikował doświadczalnie efektywność energetyczną proponowanego układu nadążnego. Są to bardzo wartościowe rozważania i wyniki, ale nie do końca odpowiadają tytułowi rozprawy. Jest to dobra podstawa do uogólnienia uzyskanych wyników i tworzenia modeli dla, w myśl tytułu, wszystkich nadążnych układów fotowoltaicznych tzn. podanie zależności o ile więcej uzyskano by energii z konkretnej instalacji w określonym czasie. Jednocześnie, takie uogólnienie wymagałoby uwzględnienia w modelu dużo większej liczby czynników – np. typu, powierzchni paneli PV, ich sprawności, konkretnych danych dot. układów nadążnych itp., co w aspekcie badania zaprojektowanego czujnika kierunku promieniowania słonecznego wraz z układem sterowania byłoby znaczącym rozszerzeniem zakresu pracy i dla badań opracowanego układu czujnik-układ sterowania nie wnoszące niczego istotnego.

Poniżej przedstawiono uwagi krytyczne i dyskusyjne do treści pracy:

Rys. 7.21 i 7.22 – czemu przyjęto takie wartości dla sum $I_{st}+I_{sn}$? Dla wartości skrajnych – wg. charakterystyk 7.19 i 7.20 – suma powinna być większa od 4A a jest jedynie 3,12A. Jednocześnie w podpisach tych rysunków powinno być „efektywnej” zamiast „afektywnej”.

Jeżeli na rys. 7.25 b) kąt azymutu o 15:36 chwilowo zmaleł do około 20° to oznacza, że układ trakera ustawił się prawie na wschód. Czym to mogło być spowodowane, bo wydaje się, że nie powinno to wpłynąć na efektywność pracy samych modułów PV a wymagało dodatkowej energii na działanie układu sterowania, zwiększyło sumaryczną drogę kątową i zmniejszyło końcową efektywność energetyczną całego układu.

Pewien niedosyt budzi fragment opisujący kierunki dalszych badań i rozwoju opracowanego rozwiązania. Są to tylko dwa zdania na końcu rozdziału 8, a na podstawie przeprowadzonych badań, uzyskanych wyników i obliczeń można było opisać trochę szerzej kierunki dalszych prac badawczych i rozwojowych.

4.2. Uwagi szczegółowe i edycyjne

Na stronie 19 podano, że sprawność perowskitów wynosi ok 30%, a na stronie 20, że 21,5%.

Str. 30 – 6 w. od dołu – podano, że na rys. 3.2. pokazano cztery typy czujników a na samy rys. 3.2. pokazano jedynie trzy typy.

Rys. 6.7 mógłby być większy – byłby bardziej czytelny.

Str. 63 – dla podanych wartości „ 90° ” i „10 %” – inny styl oznaczania jednostek niż w pozostałej części pracy, podobnie str. 101 w. 10 i 11.

Str. 66, wzory 6.6. i 6.7. – brak argumentu przy funkcji „cos”.

Str. 68, w. 3 – „czujnika” a nie „czajnika”.

Str. 70, w. 8 – „współczynnik mocy” a nie „współczynnik dobroci”.

Str. 72 wzór 6.22 – brakuje „20” i „5” - powinno być „NOCT-20” oraz T_a-25 .

Rozdział 7.1. bardziej pasuje do opisu konstrukcji i budowy samego czujnika, czyli do rozdziału 6.

Str. 78, w. 1 od dołu – podano, że błąd wzg. wynosi 0,5, a z rysunku bardziej wynika wartość 0,8.

Rys. 7.16. – pierwsze niebieskie zaznaczenie wydaje się źle położone (powinno być dla czerwonych punktów przy natężeniu powyżej 600 W/m^2 – czyli bardziej w lewo.

Wzór 7.5 i 7.6 – $I_{ns(p)}$ czy $I_{sn(p)}$ – a jeśli nie – to czemu I_{ns} nie jest wypisany w wykazie skrótów i symboli, i co to za prąd?

Rys. 7.26 i 7.27 – punkty te pokazano dla jednego z badanych dni czy dla całego okresu badań?

W pracy występują drobne błędy stylistyczne i interpunkcyjne. Wypisywanie ich wszystkich wydaje się pozbawione sensu – praca jest już napisana, wydrukowana. A w przypadku przygotowywania publikacji – zapewne będzie redagowana na nowo i raczej na pewno tłumaczona na język angielski, co skutecznie usunie wszystkie obecne błędy stylistyczne. Dla przykładu:

Str. 2, 8 wiersz od dołu – niepotrzebny przecinek po słowie „zapotrzebowanie”, a powinien być po słowie „pozycjonowanie”.

Spis symboli i oznaczeń – brak jednolitego systemu tłumaczeń skrótów anglojęzycznych – np. AC i APS lub PLC i PSC.

Str. 10, w 2 – powinno być „dynamiczne zmiany cen” – hamują, a nie hamuje. Wiersz 16-17 – powinno być „że w 2022 roku” a jest „że 2022 roku”.

Interlinie między różnymi rozdziałami są miejscami różne – porównaj np. rozdziały 3.2.2 i 6.1.1 lub 6.1 i 6.2

W trakcie lektury dysertacji nasuwają się następujące pytania:

1. Jakie są dalsze możliwości wdrożenia, badań, eksploatacji opracowanego czujnika, systemu pozycjonowania i całego układu trakera?
2. Jakie są zalety i wady opracowanego układu w kontekście przeprowadzonych badań eksploatacyjnych w porównaniu do innych opisanych w literaturze?
3. Na rys. 7.23. pokazano efektywność energetyczną opracowanego trakera dla instalacji testowej w porównaniu z testową instalacją stacjonarną. Czy uzyskane dane pomiarowe zgadzają się ze wzorami 6.13-6.22?
4. Dlaczego wartość odcięcia efektywności energetycznej w rys. 7.21 (i kolejnych) przyjęto jako $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$?
5. A jaka będzie efektywność ekonomiczna większych instalacji z układami nadążnymi?
6. Czy ochrona patentowa w ramach zgłoszeń patentowych ma obejmować jedynie obszar Polski, czy również innych krajów? Jeśli tak to jakich?
7. Czy dla opracowanych rozwiązań była robiona analiza czystości patentowej również w bazach zagranicznych?

5. Ocena końcowa dysertacji i konkluzja

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Łyszczarza jest pracą interesującą i zawierającą wartościowe wyniki badań. Wybór tematyki pracy jest trafny i na czasie w kontekście coraz większej konieczności

transformacji polskiego systemu energetycznego oraz zwiększenia udziału energii produkowanej z odnawialnych źródeł energetycznych w polskim miksie energetycznym.

Opisany w niniejszej recenzji zakres prac opisanych w rozprawie doktorskiej dowodzi, że przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego a załączone do pracy potwierdzenia przyjęcie przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej dwóch zgłoszeń patentowych równie wyraźnie potwierdza, że opracowany w ramach pracy doktorskiej czujnik kierunku promieniowania słonecznego i wynikający z jego charakteru algorytm sterowania układem nadążnego stanowi oryginalny wkład Doktoranta w zakresie możliwości zastosowania wyników badań w sferze gospodarczej.

Należy wyraźnie podkreślić, że recenzowana rozprawa pomimo uwag krytycznych pod względem merytorycznym zawiera bardzo wartościowe wyniki, a ich analiza pozwala stwierdzić, że Doktorant osiągnął postawiony w rozprawie cel. Uwagi krytyczne przedstawione w niniejszej recenzji mają w większości charakter porządkowy lub wyjaśniający i stanowią wskazówki dla przyszłych prac naukowych Doktoranta.

Podsumowując stwierdzam, że **rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Łyszcza pt. „Modelowanie efektywności energetycznej nadążnych układów fotowoltaicznych” spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”**. Wnoszę zatem o **przyjęcie rozprawy i dopuszczenie Pana mgr inż. Piotra Łyszcza do publicznej obrony**.

Jednocześnie, z uwagi na aspekt użyteczny pracy, który potwierdzają dwa zgłoszenia patentowe dotyczące opracowanego „czujnika kierunku maksymalnego promieniowania” i „sposobu sterowania nadążną instalacją PV i układu do realizacji tego sposobu” będące możliwą podstawą do komercjalizacji opracowanych rozwiązań oraz naukowy którym jest oryginalne rozwiązanie problemu badawczego w postaci projektu, budowy i opisu fizycznego czujnika kierunku promieniowania i dopasowanego do niego sposobu sterowania instalacją nadążną **wnoszę o jej wyróżnienie**.

podpisano

dr hab. inż. Maciej Neugebauer prof. UWM

Dokument podpisany
przez Maciej Neugebauer
Data: 2025.01.24
10:58:26 CET
Położenie: Olsztyn-
Kortowo; 10-719;
Warmińsko-Mazurskie;
Polska