

Olsztyn, 10.12.2018 r.

dr hab. inż. Piotr Sołowiej prof. nadzw.  
Katedra Elektrotechniki, Energetyki, Elektroniki i Automatyki  
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie  
10-738 Olsztyn, ul. Oczapowskiego 11

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Karbowniczak-Miśtał pod tytułem  
„Modelowanie systemu magazynowania energii z konwersji fotoelektrycznej w  
akumulatorze przemiany fazowej”**

### **Dane ogólne**

Recenzja niniejsza wykonana została oparciu o Umowę o Dzieło nr 1482/2018, gdzie zamawiającym jest Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie w imieniu którego działał Dziekan Wydziału Inżynierii Produkcji i Energetyki – prof. dr hab. Sławomir Kurpaska, przy kontrasygnacie p.o. Kwestora UR – mgr Macieja Oleksiaka. Rozprawa doktorska będąca przedmiotem tej recenzji została wykonana na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. Promotorem niniejszej rozprawy jest dr hab. inż. Hubert Latała, z Instytutu Inżynierii Rolniczej i Informatyki na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, a promotorem pomocniczym – dr inż. Krzysztof Nęcka z Katedry Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.

## **Informacja o rozprawie**

Rozprawa zawiera 199 stron druku formatu A-4, 12 rozdziałów w tym spis treści, wykaz oznaczeń, spis rysunków obejmujący 66 pozycji, spis tabel obejmujący 47 pozycji, 21 wzorów matematycznych i spis literatury zawierający 241 pozycji, 8 stron załączników. Widoczna jest znaczna przewaga literatury angielskojęzycznej nad polskojęzycznymi, co oznacza, że Doktorantka gruntownie przeanalizowała nie tylko krajowe, ale także zagraniczne publikacje (większość angielskojęzycznych publikacji pochodzi z wysoko punktowanych czasopism obecnych w bazie [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) wydawnictwa Elsevier). Jestem przekonany, że pozytywnie wpłynęło to na wartość naukową ocenianej przeze mnie pracy.

W pracy zawarte są ponadto definicje i objaśnienia wybranych pojęć użytych w jej treści. Wykaz ważniejszych oznaczeń znajduje się na stronach nr 5 i 6. Opisy symboli przedstawianych w zależnościach matematycznych lub na wykresach znajdują się bezpośrednio pod nimi lub są umieszczone na wykresach czy w tekście pracy.

## **Merytoryczna ocena rozprawy**

Tytuł rozprawy w pełni odpowiada zawartej w niej treści, a jej konstrukcja jest zgodna z wymaganiami stawianymi pracom o tym charakterze. Brakuje tylko streszczenia w języku polskim i angielskim co nie umniejsza wartości pracy, ale ogranicza jej dostępność. Prawidłowa jest także struktura i podział prezentowanego materiału, dlatego możliwe i w pełni uzasadnione jest dokonanie jej merytorycznej oceny.

Istotą pracy jest zbudowanie modelu systemu magazynowania energii pochodzącej z konwersji fotoelektrycznej w akumulatorze przemiany fazowej. Zagadnienie ważne ze względu na okresowość dostępu do energii promieniowania słonecznego. Magazynowanie ciepła w akumulatorze pozwala na sprawniejszą i bardziej ekonomiczną dystrybucję ciepła w obiekcie ogrzewanym. Idea zastosowania akumulatora ciepła wykorzystującego zjawisko przemiany fazowej jest bardziej korzystna od innych rozwiązań ze względu na większą pojemność cieplną w przypadku tej samej objętości.

Wysoka energochłonność produkcji rolniczej szczególnie w uprawach pod osłonami oraz systematyczny wzrost cen energii elektrycznej są głównymi przyczynami zwiększonego zainteresowania możliwościami wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Dużym zainteresowaniem cieszą się instalacje fotowoltaiczne, ze względu na to że wytworzoną energię elektryczną w stosunkowo prosty sposób można przekształcić na inne jej formy. Dobrze dobrana instalacja fotowoltaiczna może pokryć znaczą część zapotrzebowania na energię

elektryczną zasilanego obiektu, w ciągu dnia a także oraz przy zastosowaniu systemów akumulacji również w nocy.

Ze względu na dynamiczny rozwój odnawialnych źródeł energii powstał palący problem jej magazynowania. Wynika to przede wszystkim z okresowości i niestabilności dostępu do energii ze źródeł takich jak słońce czy wiatr. Obecnie w systemach magazynowania energii z systemów fotowoltaicznych jak i małych elektrowni wiatrowych głównie stosowane są akumulatory litowo-jonowe, które posiadają mniejszą liczbę ograniczeń niż akumulatory kwasowo-ołowiowe, lecz posiadają też wady takie jak zanieczyszczenie środowiska podczas ich utylizacji oraz wyższa cena.

Coraz większym zainteresowaniem w systemach ogrzewania i wentylacji cieszy się magazynowanie ciepła. Systemy magazynowania energii cieplnej można podzielić na kilka grup: magazynowanie termochemiczne, magazynowanie z wykorzystaniem ciepła właściwego i magazynowanie ciepła utajonego lub kombinacja tych systemów. Termiczne magazynowanie energii pozwala na przechowywanie ciepła i chłodu do użytku w przypadku gdy mamy do czynienia z przesunięciem czasowym między dostępem do energii a jej wykorzystaniem przykładowo, energia słoneczna pozyskiwana w ciągu dnia może być wykorzystana do ogrzewania w nocy, a chłód z nocy może być przechowywany do użytku w ciągu dnia. W rezultacie umożliwia to zmniejszenie wielkości urządzeń grzewczych i chłodzących, przez co ogólne zapotrzebowanie na energię elektryczną i ciepło w okresach szczytowego zapotrzebowania jest mniejsze.

Magazynowanie energii wydaje się obecnie celowe i uzasadnione nie tylko w energetyce zawodowej, ale również w produkcji rolniczej szczególnie w procesach suszarniczych, przygotowania wody technologicznej, czy do ogrzewania obiektów. Mimo wieloletnich badań prowadzonych w tym zakresie istnieje potrzeba poszerzenia wiedzy zwłaszcza w zakresie związanym z modelowaniem pracy akumulatora w warunkach rzeczywistych. Istnieje, bowiem bardzo wiele czynników wpływających na proces magazynowania energii w akumulatorze przemiany fazowej. Najważniejszymi z nich są parametry fizykochemiczne i konstrukcyjne złoża magazynującego jak również ilość dostarczanej do niego energii. Efektywne modele procesu pracy akumulatora pozwalają na znacznie skrócenie czasu optymalizacji poszczególnych elementów systemu, a tym samym ograniczają nakłady finansowe na jego budowę. Stosowanie takich modeli może mieć także wpływ na dobór kluczowych parametrów i sterowanie pracą w trakcie eksploatacji celem zwiększenia efektywności wykorzystania dostępnej energii.

Celem pracy było zbudowanie modelu magazynowania energii pochodzącej z konwersji fotoelektrycznej w akumulatorze przemiany fazowej. Opracowany model posłużył do określenia wymaganej mocy siłowni fotowoltaicznej umożliwiając efektywne wykorzystanie jego pojemności cieplnej.

Cel zrealizowano w następujących etapach, opracowując:

1. Model uzysku energii elektrycznej z konwersji promieniowania słonecznego dla badanych typów ogniw fotowoltaicznych.
2. Model magazynowania ciepła w akumulatorze PCM.
3. Model strat energii w akumulatorze PCM.
4. Model gromadzenia energii z konwersji fotoelektrycznej w akumulatorze PCM.

Na podstawie przedstawionego celu badań doktorantka sformułowała hipotezę rozprawy:

Wielkość i typ instalacji fotowoltaicznej współpracującej z akumulatorem PCM mogą być określone przez opracowane modele na podstawie danych zbieranych podczas obserwacji procesu magazynowania energii w obiekcie rzeczywistym.

Aby wyjaśnić postawioną hipotezę doktorantka zaplanowała zrealizowała etapy badań:

1. zgromadzenie danych charakteryzujących uzysk energii elektrycznej z różnych typów instalacji fotowoltaicznych,
2. zgromadzenie danych charakteryzujących zdolność magazynowania energii w materiale zmiennofazowym, jakim była parafina R58,
3. modelowanie uzysku energii elektrycznej z siłowni fotowoltaicznej,
4. modelowanie procesu gromadzenia energii w akumulatorze PCM,
5. analizę wyników opracowanych modeli i wybór optymalnego modelu,
6. ocenę wskaźnika magazynowania energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznej w akumulatorze PCM.

Przedmiotem badań była siłownia fotowoltaiczna usytuowana na terenie Wydziału Inżynierii Produkcji i Energetyki w Krakowie, zbudowana z trzech rodzajów modułów fotowoltaicznych:

- monokrystalicznych o całkowitej mocy zainstalowanej 4,2 kWp,
- polikrystalicznych o całkowitej mocy zainstalowanej 4,27 kWp,
- cienkowarstwowych CIGS o całkowitej mocy zainstalowanej 4,4 kWp,

oraz prototyp akumulatora przemiany fazowej, magazynujący energię wygenerowaną z siłowni fotowoltaicznej. Medium magazynujące ciepło w akumulatorze przemiany fazowej stanowiła parafina R58. Masa wypełnienia wynosiła 750 kg parafiny.

Do realizacji celu pracy, doktorantka wyodrębniła etapy modelowania:

1. Model uzysku energii elektrycznej z siłowni fotowoltaicznej dla poszczególnych typów ogniw fotowoltaicznych.
2. Model szacujący ilość zgromadzonej energii w akumulatorze PCM.
  - a. Model procesu magazynowania energii w akumulatorze.
  - b. Model strat energii w akumulatorze PCM.

Po zebraniu danych empirycznych doktorantka przystąpiła do opracowania modeli predykcyjnych, pozwalających na wyznaczenie uzysku energii elektrycznej z siłowni fotowoltaicznej pracującej w oparciu o poszczególne rodzaje ogniw PV opracowując prognozy w oparciu o modele, które zostały wybrane na podstawie literatury przedmiotu: sztuczne sieci neuronowe (SSN), drzewa regresyjne standardowe (BRT), wzmacniane (CHAID) i wyczerpujące (C&RT) oraz standardowej regresji wielorakiej (SMR), losowego lasu (RF) i Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS).

Doktorantka opracowała trzy modele cząstkowe (uzysku energii z konwersji fotoelektrycznej, procesu ładowania akumulatora i strat energii w okresie przerw w ładowaniu) i przeprowadziła ich walidację, następnie połączyła dokonując analiz zmierzających do wyjaśnienia hipotezy badawczej.

Podsumowując tę część recenzji należy stwierdzić iż doktorantka osiągnęła cel pracy opracowując model służący do określenia wymaganej mocy siłowni fotowoltaicznej umożliwiającej efektywne wykorzystanie pojemności cieplnej określonego akumulatora PCM. Opracowany model w sposób bardzo dobry prognozuje powierzone mu zadania, chociaż posiada pewne ograniczenia. Ograniczenia te zostały jednak, dokładnie określone przez autorkę, co wystarczająco precyzuje zakres jego stosowania

Badania zostały przeprowadzone zgodnie z dobrą praktyką naukową oraz obowiązującymi normami. Zarówno opisane stanowiska badawczej jak i aparatura pomiarowa stanowią gwarancje uzyskania prawidłowych i rzetelnych wyników. Wykorzystanie narzędzi informatycznych, implementacja oraz interpretacja opracowywanych zagadnień również nie budzi moich zastrzeżeń.

W rozdziale „Podsumowanie i wnioski” mimo, że doskonale opisuje rezultaty pracy nie widzę żadnego wniosku.

Po przeczytaniu i analizie pracy nasunęły mi się pytania, na które dobrze by było odpowiedzieć w celu szerszego spojrzenia na poruszany w pracy problem.

1. Czy brała Pani pod uwagę inne sposoby „ładowania” akumulatora – np. słoneczne kolektory powietrzne?
2. Dlaczego parafina R-58?
3. Czy może Pani przedstawić konkretny wniosek wynikający z pracy jaką Pani wykonała?

### Uwagi szczegółowe

Pod względem edytorskim i graficznym praca została starannie przygotowana. Mimo to Doktorantka nie ustrzegła się pewnych uchybień formalnych i redakcyjnych. Uwagi dotyczą przede wszystkim zagadnień związanych z bibliografią załącznikową. W bibliografii Doktorantka umieściła pozycje, które nie są cytowane w tekście. Są to pozycje nr: 2,22,73,87,133. Pozycje [Piotrowski 2014] i [Pietkiewicz i in. 2012] są zacytowane w tekście a nie ma ich w bibliografii. Poza tym błędy interpunkcyjne i gramatyczne:

Strona	Wiersz	Jest	Winno być
12	10	odnawialnej energii elektrycznej	Energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych
13	8	Wspierane przez kompleksowe ramy legislacyjne, ostatnio	wspierane przez kompleksowe ramy legislacyjne. Ostatnio
16	11	niekorzystnych wydarzeń w ostatnich latach	niekorzystnych wydarzeń.
16	16	bezpieczeństwo paliw	?
17	8	wykorzystanie istniejących zapór, należących do skarbu państwa do produkcji energii elektrycznej	?
22	4 od dołu	docenia	doceniać
23	7	exajoules	eksadzuli
26	13	wyzwani	wyzwanie
27	7	materiał	materiału
32	10	charakterystykę eklektyczną	charakterystykę elektryczną
33	wielokrotnie	zacienienie	zacienienie
33	10	polaryzacja jest przeciwna do ogni	polaryzacja jest przeciwna do polaryzacji ogni
33	24	moduły fotowoltaiczny	moduły fotowoltaiczne
33	24	falownik generuje własną mikrosieć	falownik obsługuje własną mikrosieć
35	7	promieniowania słonecznej	promieniowania słonecznego
43	8 od dołu	6 do 13 GJ (ha · rok) <sup>-1</sup>	6 do 13 GJ ha·rok <sup>-1</sup>
46	18	spowodowane	spowodowaną
47	5 od dołu	wykorzystuje sieć	wykonano z wykorzystaniem sieci typu
49	4	podarż	podaż

52	9	wyparowaniu	wyparowania
54	11	materiał przemiany	ciepło przemiany
55	7	temperaturowa równowaga	temperatura równowagi
57	10	przechowywaniu ciepła właściwego	przechowywaniu z wykorzystaniem zjawiska ciepła właściwego
57	12	magazynowanie ciepła utajonego	magazynowanie z wykorzystaniem zjawiska ciepła utajonego
57	14	Energia	energii
60	2	zbędny odstęp	
60	17	cię	się
60	22	cielna	cieplna
61	8	wyboru	wybór
62	6 od dołu	szklarniowych	szklarniowym
63	8 od dołu	idealny	idealna
64	5 od dołu	ogrzewania cieplnego	ogrzewania
64	1 i 2 od dołu	zainstalowanie.....	?
66	1	magazynowani	magazynowanie
67	22	zamknięta w zbiorniku	w zamkniętym zbiorniku
93	wzór 12 i 13	$T_{m+e2}$	$T_{m+e2}$
98	1	poziom	poziomu
120	7	dla metody	stosując metodę
121	4	na panelach cienko...	z wykorzystaniem paneli cienko.....
123	5	tangensoidalna	tangensoidalną
125	2	charakterują	charakteryzują
137	1 od dołu	dostarczona	dostarczoną
143	7	od modelowani	nad modelowaniem
153	2	5,5 kWh•kW <sup>-1</sup>	5,5 kWh•kWp <sup>-1</sup>
153	11	o potrzeb	od potrzeb
156	2	zmianą	zmianom
158	5	został	została

Tytuł rozdziału 9.3.1. nie jest adekwatny jego zawartości. Na stronie Doktorantka napisała „w okresie od kwietnia do września 2016 i 2017”. Czy oznacza to okres od kwietnia 2016 do września 2017 czy coś innego? Brak konsekwencji w opisie tabel 41, 42, 43. Na stronie 144 Doktorantka napisała: „ Wykorzystany w pracy akumulator pozwolił na zmagazynowanie ok. 85 % dostarczonej energii elektrycznej.” Zdanie sugeruje, że w akumulatorze była magazynowana energia elektryczna a tak nie jest.

### Wniosek końcowy

Jednak, pomimo drobnych uwag formalnych i redakcyjnych mogę stwierdzić, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Anny Karbowniczak-Miśtał zatytułowana „Modelowanie systemu magazynowania energii z konwersji fotoelektrycznej w akumulatorze przemiany fazowej” stanowi istotny wkład w uzupełnienie i rozwój stanu wiedzy z zakresu konwersji i magazynowani energii.

W mojej opinii, sformułowany przez Doktorantkę cel pracy w określonym zakresie badań został w pełni osiągnięty dzięki szczegółowym badaniom i zarówno empirycznym jak i modelowym.

Doktorantka wykazała się bardzo dobrą znajomością problematyki w zakresie wynikającym z tematu rozprawy oraz bardzo dobrym przygotowaniem metodologicznym i formalnym do rozwiązania oryginalnego problemu naukowego, co w pełni potwierdza przygotowanie Doktorantki do samodzielnej pracy naukowej.

Przedstawiona praca w zupełności odpowiada merytorycznym i formalnym wymaganiom zawartym w art. 13 i 14 oraz 31 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki - tekst ujednolicony z dnia 18 marca 2011 roku (Dz. U. nr 65 poz. 595 ze zm. Dz. U. z 2005 r. nr 164, poz. 1365 oraz Dz. U. z 2011 r. nr 84, poz. 455) oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. nr 204, poz. 1200).

Wobec powyższego stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej pt. „Modelowanie systemu magazynowania energii z konwersji fotoelektrycznej w akumulatorze przemiany fazowej” i dopuszczenie mgr inż. Anny Karbowniczak-Miśtał do jej publicznej obrony na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie w dyscyplinie „inżynieria rolnicza”.

Biorąc pod uwagę bardzo wysoki poziom naukowy rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Karbowniczak-Miśtał obejmujący między innymi szeroki przegląd stanu wiedzy, stronę merytoryczną i metodyczną oraz wzorowe przeprowadzenie prac eksperymentalnych oraz modelowych, wnioskuję o wyróżnienie pracy - mimo występujących w niej pewnych uchybień formalnych.

Piotr Szwed