

Autoreferat

Opis dorobku i osiągnięć naukowych

dr inż. Jacek Kapica

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Wydział Inżynierii Produkcji

Katedra Podstaw Techniki

ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin

1 SPIS TREŚCI

2	Charakterystyka Habilitanta.....	3
2.1	Imię i Nazwisko	3
2.2	Uzyskane dyplomy i stopnie naukowe.....	3
2.3	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	3
3	Wskazanie osiągnięcia naukowego	4
3.1	Omówienie celu naukowego prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego, osiągniętych wyników i możliwych zastosowań	5
3.1.1	Wprowadzenie.....	5
3.1.2	Problem naukowy i cel badań	6
3.1.3	Omówienie rezultatów przedstawionych w publikacjach wskazanych jako osiągnięcie naukowe	7
3.1.4	Bibliografia.....	18
4	Omówienie dorobku naukowego nie wchodzącego w skład osiągnięcia naukowego wymienionego w punkcie 3	21
4.1	Dorobek naukowy przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora.....	21
4.2	Dorobek naukowy po uzyskaniu stopnia naukowego doktora	22
5	Pozostała działalność opiekuńcza, organizacyjna, popularyzatorska i dydaktyczna	24
5.1	Opieka nad studentami i młodymi pracownikami nauki	24
5.2	Działalność dydaktyczna.....	24
5.3	Działalność popularyzatorska	24
6	Podsumowanie dorobku naukowego.....	25

2 CHARAKTERYSTYKA HABILITANTA

2.1 IMIĘ I NAZWISKO

Jacek Kapica

2.2 UZYSKANE DYPLOMY I STOPNIE NAUKOWE

Magister inżynier

Politechnika Lubelska

Kierunek: Elektrotechnika, **specjalność:** Przetwarzanie i użytkowanie energii elektrycznej

Tytuł pracy magisterskiej: Określenie bazy wiedzy systemu diagnostycznego dla asynchronicznej kaskady zaworowej

Promotor: dr hab. inż. Wojciech Jarzyna

Ocena pracy magisterskiej: bardzo dobra

Data obrony: 22.09.1993

Doktor nauk technicznych

Instytut Elektrotechniki w Warszawie

Dyscyplina: elektrotechnika

Specjalność: napęd elektryczny i elektrotechnika przemysłowa

Data uzyskania stopnia: 01/07/1999

Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Paweł Skoczkowski

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Horodecki, prof. dr hab. inż. Tadeusz Antoni Rodacki

Tytuł rozprawy doktorskiej: Analiza pracy generatorów fotowoltaicznych zasilających układy napędowe z silnikami prądu stałego

2.3 INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

1.02.1994 – 30.09.1999 asystent w Zakładzie Elektrotechniki i Elektryfikacji Rolnictwa, Akademia Rolnicza w Lublinie

1.10.1999 do chwili obecnej adiunkt w Zakładzie Elektrotechniki i Systemów Sterowania (wcześniej Zakładu Elektrotechniki i Systemów Pomiarowych) Katedry Podstaw techniki Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie (wcześniej Akademii Rolniczej w Lublinie).

3 WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

Jako osiągnięcie, wynikające z artykułu 16. ustęp 2. ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, wskazuję cykl siedmiu powiązanych tematycznie publikacji, wydanych po uzyskaniu stopnia naukowego doktora. Tytuł osiągnięcia naukowego:

**TECHNIKI INFORMATYCZNE W MODELOWANIU WYBRANYCH ELEMENTÓW
SYSTEMÓW TECHNICZNYCH WYKORZYSTUJĄCYCH ENERGIĘ SŁOŃCA I WIATRU
W ROLNICTWIE**

W skład osiągnięcia naukowego wchodzi następujące publikacje:

- A. Jacek Kapica. *Zastosowanie transformaty falkowej do filtrowania szybkozmiennych składowych krzywej natężenia promieniowania słonecznego*. Inż. Rol. 2010 Nr 7(125), s. 87-92, **6 p. MNiSW.**
- B. Jacek Kapica, Marek Ścibisz. *Employing empirical mode decomposition to determine solar radiation intensity curve*. Teki Komis. Mot. Energ. Rol._Pol. Akad. Nauk., Oddz. Lubl. 2013 T. 13 No 1, 65-70, **6 p. MNiSW.**

Mój wkład w powstanie tej pracy szacuję na 90 %. Obejmował on przygotowanie założeń badawczych, przeprowadzenie symulacji w środowisku Octave, interpretację wyników, autorstwo głównej części tekstu manuskryptu, dobór zasadniczej części literatury, wykonanie ilustracji.

- C. Jacek Kapica. *Comparison of wind turbine energy production models for rural applications*. Teki Komis. Mot. Energ. Rol._Pol. Akad. Nauk., Oddz. Lubl. 2014 T. 14 No 3, 37-42, **6 p. MNiSW.**
- D. Jacek Kapica, Halina Pawlak, Marek Ścibisz. *Carbon dioxide emission reduction by heating poultry houses from renewable energy sources in Central Europe*. Agric. Syst. 2015 Vol. 139, 238-249, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.08.001> **IF 2,867, 50 p. MNiSW.**

Mój wkład w powstanie tej pracy szacuję na 90 %. Obejmował on przygotowanie założeń badawczych, przeprowadzenie symulacji w środowisku Matlab/Simulink, zasadniczą część interpretacji wyników, autorstwo głównej części tekstu manuskryptu, dobór zasadniczej części literatury.

- E. Jacek Kapica. *Fuel cells as energy storage for photovoltaic energy sources in rural areas*. Teki Komis. Mot. Energ. Rol._Pol. Akad. Nauk., Oddz. Lubl. 2014 T. 14 No 3, 43-46, **6 p. MNiSW.**

- F. Jacek Kapica. *Black box dynamic modelling of proton exchange membrane fuel cells with artificial neural networks*. EconTechMod 2016 Vol. 5 No 4, 85-95, **12 p. MNiSW**.
- G. Jacek Kapica. *Small scale stand-alone photovoltaic pumping system with brushless DC motor for irrigation in agriculture*. <https://doi.org/10.1063/1.4991456> (in press), Journal of Renewable and Sustainable Energy, **IF 1,135 , 20 p. MNiSW**.

Łączna liczba punktów za publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego wynosi 106, sumaryczny Impact Factor wynosi 4,002.

3.1 OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO PRAC WCHODZĄCYCH W SKŁAD OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO, OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW I MOŻLIWYCH ZASTOSOWAŃ

3.1.1 Wprowadzenie

Rozwojowi cywilizacyjnemu, który można zaobserwować w minionych dziesięcioleciach towarzyszy wzrost zapotrzebowania na energię. Z produkcją energii z paliw kopalnych związany jest wieloraki, negatywny wpływ na środowisko przyrodnicze. Osiągnięcie zrównoważonego rozwoju może być dokonane w trzech obszarach: ograniczenie zużycia energii, wzrost sprawności w procesie przetwarzania energii oraz eliminacja paliw kopalnych (Lund, 2007). Energia pochodząca ze źródeł odnawialnych zaspokaja jak dotąd około 14 % światowego zapotrzebowania (IEA, 2016). Biorąc pod uwagę konieczność redukcji emisji gazów cieplarnianych, konieczne jest szersze wykorzystanie źródeł odnawialnych (Lee and Zhong, 2014).

Produkcja rolna jest odpowiedzialna za około 22 % globalnej emisji gazów cieplarnianych, z czego 80 % przypada na produkcję zwierzęcą (włączając transport paszy oraz zwierząt) (McMichael et al., 2007). Biorąc nawet pod uwagę, że za produkcję gazów cieplarnianych w sektorze rolniczym w części odpowiedzialne jest wytwarzanie energii, zwiększanie udziału odnawialnych źródeł energii pozwoli na zmniejszenie negatywnego wpływu tego sektora gospodarki na środowisko przyrodnicze.

Główną motywacją rolników, która sprawia, że są oni zainteresowani stosowaniem odnawialnych źródeł energii są czynniki ekonomiczne. Chcą oni także uniezależnić się od zmian cen nośników energii w przyszłości oraz zdywersyfikować swoje źródła dochodu.

Czynniki, które sprawiają, że rolnictwo jest szczególnie korzystnym obszarem wykorzystania energii Słońca i wiatru to m.in.:

- sezonowa podaż energii słonecznej czy wiatrowej często idzie w parze z naturalnym cyklem produkcji rolnej,
- większa dostępność terenu, który może być zajęty przez urządzenia pozyskujące energię,
- fakt, że energia jest dostępna w miejscu jej wytwarzania,
- brak wytwarzania zanieczyszczeń,

- zwykle niskie koszty ruchowe oraz prosta budowa, co pozwala na utrzymanie w ruchu przez personel o niższych kwalifikacjach.

Główną niedogodnością przy wykorzystaniu energii Słońca i wiatru jest zmienność promieniowania oraz siły wiatru w czasie. W celu zminimalizowania jej wpływu stosuje się urządzenia magazynujące energię pod różnymi postaciami: termiczną, chemiczną, elektrostatyczną czy potencjalną grawitacji. W ostatnich latach obserwuje się istotny postęp w konstrukcji ogniw paliwowych oraz kondensatorów wielkich pojemności (tzw. superkondensatorów). Z tego powodu opracowania E, F i G dotyczą modelowania oraz analizy ich przydatności w układach pozyskujących energię Słońca i wiatru w kontekście inżynierii rolniczej.

Modelowanie numeryczne jest narzędziem, które pozwala na łatwe określenie właściwości różnych systemów poprzez analizę ich pracy w różnych wariantach oraz warunkach. Uzyskanie podobnej elastyczności w badaniach laboratoryjnych jest w praktyce niemożliwe. Poprawnie skonstruowany model komputerowy rzeczywistego układu staje się obiektem, na którym przeprowadzamy eksperymenty w celu dokonania obserwacji oraz wyciągnięcia wniosków co do jego właściwości.

Można wyróżnić co najmniej trzy ogólne sposoby podejścia do budowy modelu (Leigh, 2004):

- a) Wykorzystanie formuły empirycznej, w której zależność pomiędzy wejściem a wyjściem jest opisana prostym równaniem (lub zestawem równań, uwzględniając podział zakresu danych wejściowych na przedziały), na przykład wielomianowym i dopasować numerycznie współczynniki tego równania tak, aby dla posiadanych danych błąd modelowania był jak najniższy.
- b) Zbudować zestaw powiązanych ze sobą równań opisujących zjawiska fizyczne zachodzące w modelowanym obiekcie.
- c) Opracować model typu „czarna skrzynka” z wykorzystaniem np. sztucznej sieci neuronowej zakładając, że odpowiednio ukształtowany model będzie z powodzeniem reprezentował modelowany obiekt w szerokim zakresie danych wejściowych.

W procesie modelowania można wyróżnić etapy takie jak: przygotowanie danych wejściowych, wybór typu i struktury modelu, implementacja modelu w określonym środowisku programistycznym, przeprowadzenie symulacji, wizualizacja i analiza wyników symulacji. Znajduje to odzwierciedlenie w układzie, w jakim zaprezentowano poszczególne artykuły wchodzące w skład osiągnięcia naukowego.

3.1.2 Problem naukowy i cel badań

Problem naukowy został sformułowany w postaci poniższych pytań.

1. Czy zasadne jest wstępne przygotowanie danych promieniowania słonecznego wykorzystywanych do modelowania rolniczych układów wykorzystujących energię słoneczną?
2. Czy stosunkowo proste modele wybranych urządzeń pozyskujących i magazynujących energię mogą służyć określeniu ich właściwości oraz oszacowaniu energii możliwej do pozyskania z ich pomocą?

3. W jakim stopniu energia Słońca i wiatru może ograniczyć emisję gazów cieplarnianych z układów ogrzewania budynków hodowlanych?
4. Czy i w jakim stopniu zastosowanie urządzeń magazynujących energię poprawia właściwości systemów pozyskujących energię Słońca i wiatru?

Celem przeprowadzonych badań było:

1. Sprawdzenie przydatności wybranych procedur przygotowania danych wejściowych oraz modelowania wybranych układów pozyskujących i magazynujących energię Słońca i wiatru w kontekście zastosowań rolniczych.
2. Określenie właściwości i przydatności tych układów w inżynierii rolniczej.

3.1.3 Omówienie rezultatów przedstawionych w publikacjach wskazanych jako osiągnięcie naukowe

3.1.3.1 *Filtrowanie szybkozmiennych składowych promieniowania słonecznego*

Promieniowanie słoneczne, zależnie od warunków meteorologicznych panujących danego dnia, może charakteryzować się różnym stopniem zmienności. W dzień bezchmurny lub kiedy niebo pokryte jest względnie jednorodną warstwą chmur, intensywność promieniowania słonecznego zmienia się powoli. Jednak kiedy niebo pokryte jest małymi chmurami, w wietrzny dzień, można zaobserwować szybkie zmiany promieniowania.

Sprawność zestawu generatora fotowoltaicznego – obciążenie elektryczne zależy od tego, jak blisko punktów maksymalnej mocy generatora fotowoltaicznego przy różnym poziomie promieniowania słonecznego leży charakterystyka prądowo-napięciowa obciążenia. Zagadnienie to jest istotne szczególnie w przypadku systemu fotowoltaicznego niepodłączonego do sieci elektroenergetycznej bez baterii akumulatorów. Jest to szczególnie ważne w aspekcie zastosowań rolniczych, gdzie tego typu systemy mogą być z powodzeniem stosowane.

W związku z tym, przy analizie pracy systemów fotowoltaicznych często oprócz sumy energii promieniowania słonecznego w danym dniu uwzględnia się wartości chwilowe promieniowania słonecznego (Sarniak, 2011). Większe dokładności można uzyskać wykorzystując dane pozyskane z wysoką częstotliwością próbkowania. Podejście takie powoduje powstawanie dużej ilości danych, co w przypadku długotrwałych pomiarów może być kłopotliwe ze względu na zajmowaną powierzchnię dyskową jak i obciążenie mikroprocesora w przypadku wykorzystania tych danych do symulacji.

Rozwiązaniem jest zmniejszenie częstotliwości próbkowania. W takim przypadku jednak próbki są pobierane w przypadkowych punktach czasu i może się zdarzyć, że zostaną pobrane w chwili, która nie jest reprezentatywna dla całego okresu, na przykład podczas krótkotrwałego zachmurzenia. Alternatywnym podejściem jest akwizycja danych z dużą częstotliwością, ich obróbka w celu wyeliminowania wysokiej zmienności i ponowne próbkowanie z niższą częstotliwością w celu archiwizacji i dalszego wykorzystania.

Publikacje **A** oraz **B** przedstawiają dwie innowacyjne metody przygotowania danych natężenia promieniowania słonecznego.

Artykuł A omawia zastosowanie transformaty falkowej do filtrowania szybkozmiennych składowych krzywej natężenia promieniowania słonecznego. Zastosowanie transformaty falkowej, w odróżnieniu od transformaty Fouriera, pozwala umiejscowić w czasie zmienność sygnału. Z tego powodu jest to narzędzie szczególnie przydatne przy analizie sygnałów niestacjonarnych. Odfiltrowanie sygnału szybkozmiennego polega na jego rozkładzie na składowe o różnych skalach a następnie rekonstrukcji sygnału po usunięciu składowych szybkozmiennych.

W celu sprawdzenia przydatności proponowanej metody dokonano pomiarów natężenia promieniowania słonecznego z krótkim, jak na tego typu pomiary, okresem próbkowania wynoszącym 0,5 s. Następnie sygnał został rozłożony na siedem poziomów dekompozycji z wykorzystaniem falki Haara. Przy rekonstrukcji pozostawiono składową odpowiedzialną za najwolniejsze zmiany. Następnie zamodelowano pracę prostego rolniczego układu napędowego z silnikiem prądu stałego obciążonego maszyną o wentylatorowej charakterystyce momentu hamującego (np. wentylatora czy pompy odśrodkowej) zasilanego z generatora fotowoltaicznego.

Uzyskane rezultaty wskazują, że przy zastosowaniu krótszych odstępów pomiędzy kolejnymi próbkami, błąd wyznaczenia dziennej energii padającego promieniowania słonecznego jest zazwyczaj mniejszy. W przypadku wyznaczenia dziennej energii mechanicznej uzyskanej z układu napędzającego wentylator, dokładność jest wyraźnie wyższa po uprzednim odfiltrowaniu składowych szybkozmiennych. W przypadkach, gdy wymagane jest gromadzenie danych z dłuższych okresów, warto dokonać pomiarów z krótszym okresem próbkowania, usunąć opisaną metodą składowe szybkozmiennie i przed archiwizacją ponownie spróbować tak otrzymany sygnał z dłuższym okresem próbkowania. Pozwoli to na uzyskanie większej dokładności obliczeń dokonywanych z wykorzystaniem tak przygotowanych danych.

W **artykule B** proponuję odmienną metodę postępowania, która polega na zastosowaniu empirycznej dekompozycji modów.

Empiryczna dekompozycja modów jest stosunkowo nową techniką, która może być stosowana do sygnałów nieliniowych i niestacjonarnych (Fleureau et al., 2011). Polega ona na rozkładzie sygnału na skończoną liczbę tzw. składowych funkcji IMF (ang. intrinsic mode function) oraz residuum. Szczegółowy opis algorytmu jest omówiony w publikacjach (Huang et al., 1998; Huang and Shen, 2005).

Jedną z podstawowych zalet dekompozycji sygnału z wykorzystaniem empirycznej dekompozycji modów jest fakt, że nie ma konieczności zakładania z góry jaka funkcja zostanie użyta w celu reprezentacji sygnału, w odróżnieniu od transformaty Fouriera, w której wykorzystywana jest funkcja sinusoidalna czy transformaty falkowej, gdzie przed rozpoczęciem analizy należy wybrać falkę podstawową (ang. *mother wavelet*).

Jako sygnał oryginalny wykorzystałem przebieg próbkowany z okresem 1 s. Filtrowanie sygnału odbywało się w dwóch etapach: 1. Dekompozycja sygnału wejściowego na zestaw funkcji IMF, 2. Rekonstrukcja sygnału po eliminacji funkcji IMF reprezentujących najszybsze zmiany. W wyniku tej operacji powstaje nowy sygnał, z którego wyeliminowano najszybsze oscylacje.

Sygnał wejściowy był rozkładany na 20 funkcji IMF oraz residuum. Przeprowadziłem badania nad tym, jak liczba funkcji IMF wyeliminowanych z sygnału wejściowego wpływa na względny błąd wyznaczenia dziennej energii elektrycznej przy wykorzystaniu tak otrzymanego przebiegu dla różnych częstotliwości próbkowania. Obliczenia wykonywałem w środowisku GNU Octave, które wykorzystuje ten sam język programowania, co środowisko Matlab.

Zastosowanie proponowanej metody pozwala na zwiększenie dokładności modelowania z wykorzystaniem tak przygotowanych danych. W większości przypadków błąd wyznaczenia dziennej energii jest niższy niż bez filtrowania (do 1 punktu procentowego), w niektórych przypadkach jest podobnego rzędu. Doświadczenie pokazuje, że nie należy eliminować więcej niż 10 funkcji IMF odpowiedzialnych za najszybsze oscylacje, ponieważ rezultat filtrowania staje się przypadkowy – w niektórych sytuacjach otrzymuje się niskie błędy, w innych bardzo wysokie.

3.1.3.2 Porównanie procedur obliczeniowych służących wyznaczeniu energii wytwarzanej przez turbiny wiatrowe

Wiatr jest postrzegany przez wielu jako atrakcyjne źródło energii odnawialnej (Mathew, 2006). Polska dysponuje umiarkowanymi zasobami energii wiatru. Około 2/3 powierzchni kraju leży w obszarze, w którym roczna energia wiatru na wysokości 30 m zawiera się w przedziale 750 do 1500 kWhm⁻² (Michalak and Zimny, 2011).

Można wyróżnić wiele sposobów podejścia do zagadnienia szacowania energii wytwarzanej przez turbinę wiatrową. Niektórzy autorzy proponują rozbudowane metody bazujące na logice rozmytej, sieciach neuronowych (Jafarian and Ranjbar, 2010; Üstüntaş and Şahin, 2008) czy wydobywaniu danych (Lydia et al., 2014; Schlechtingen et al., 2013).

W publikacji C przedstawiłem proste modele charakterystyki prędkości wiatru - moc, które mogą być wykorzystane z zastosowanych prostych narzędzi obliczeniowych do oszacowania energii wyprodukowanej przez turbinę wiatrową. Następnie, przy użyciu tych modeli oszacowałem ilość energii wyprodukowanej w ciągu 30 dni przez turbiny dla trzech wartości średniej prędkości wiatru i założeniu, że prędkości te mają rozkład statystyczny Rayleigha. Analizy przeprowadziłem dla czterech modeli turbin wyprodukowanych przez trzech różnych producentów. Założyłem trzy, stosunkowo niewielkie średnie wartości prędkości wiatru: 3, 3,5 i 4 ms⁻¹. Wartości te są typowe dla większości terytorium Polski.

W pracy uwzględniłem modelowanie przy wykorzystaniu krzywej podanej przez producenta, jej aproksymację za pomocą wielomianu oraz modelu, w którym zakłada się, że energia wyprodukowana jest określoną (przy uwzględnieniu stałej sprawności) częścią energii wiatru. Przy określaniu błędu względnego wyznaczenia energii pozyskanej w ciągu 30 dni jako odniesienie przyjąłem wynik obliczeń z wykorzystaniem krzywej producenta.

Uzyskane wyniki wskazują, że błędy w większości przypadków mieściły się poniżej 10 %, za wyjątkiem turbiny, której charakterystyka miała kształt wyraźnie odmienny od typowego przebiegu. Można też wnioskować, że w uproszczonych modelach wielomianowych w warunkach polskich istotne jest dokładniejsze odzwierciedlenie krzywej turbiny dla małych prędkości wiatru (poniżej 2 m/s). Omówione modele mogą z powodzeniem być wykorzystane w celu oszacowania ilości wyprodukowanej energii w sytuacjach, kiedy krzywa mocy turbiny nie jest dostępna.

Dodatkowo wyjaśnić należy, że na skutek błędu w procesie wydawniczym w opisie pod Tabelą 1 grecka litera „ η ” została zamieniona na literę „h”, co może utrudniać zrozumienie tejże tabeli.

3.1.3.3 Określenie możliwości zredukowania emisji dwutlenku węgla poprzez wykorzystanie energii Słońca i wiatru do ogrzewania budynków hodowlanych na przykładzie ogrzewania kurnika

Dobrostan ptaków hodowlanych w znacznym stopniu jest uzależniony od temperatury panującej w kurniku. W lecie odpowiednie kroki powinny być podjęte w celu uniknięcia przegrzania (Lin et al., 2006). Z kolei zimą niskie temperatury zewnętrzne powodują konieczność ogrzewania, ze względu na to, że rekomendowane temperatury w przypadku brojlerów zawierają się w granicach 21 – 32 °C, zależnie od okresu chowu (Ashrae, 2009).

Szacuje się, że 84 % energii w produkcji drobiu jest pochłaniane na potrzeby ogrzewania (TEAGASC, 2011). Z tego powodu istotne jest poszukiwanie alternatywnych sposobów ogrzewania, szczególnie w przypadku Polski, gdzie węgiel kamienny jest wciąż ważnym nośnikiem energii.

Publikacja D przedstawia możliwości redukcji emisji CO₂ poprzez zamianę konwencjonalnego systemu ogrzewania kurnika na hybrydowy układ wykorzystujący energię wiatru i Słońca. Obliczyłem zapotrzebowanie cieplne obiektu przeznaczonego dla 2400 ptaków. Układ został zamodelowany w środowisku Matlab/Simulink.

Przeanalizowałem różne konfiguracje systemu pracującego w warunkach typowych dla Europy Środkowej. Jednym z założonych celów było sprawdzenie, czy i w jaki sposób obydwie źródła będą ze sobą współpracowały. W tym celu powierzchnia kolektora była zmieniana w zakresie 0 – 80 m² a średnica turbiny w zakresie 0 – 20 m. Ograniczenie powierzchni kolektorów oraz średnicy turbiny wynikało z realnych możliwości zabudowy dachu modelowanego budynku oraz realnie możliwej do wykonania i zainstalowania w pobliżu gospodarstwa rolnego turbiny. Przewidziałem także magazyn energii w postaci 1 – 4 izolowanych termicznie zbiorników o pojemności 15 m³ napełnionych wodą oraz możliwość uruchomienia kotła na paliwa kopalne w sytuacji, gdy energia pozyskana ze źródeł odnawialnych byłaby niewystarczająca do zaspokojenia zapotrzebowania cieplnego. Do zamodelowania pracy turbiny został wykorzystany jeden ze sprawdzonych wcześniej modeli (artykuł C).

Przy wyznaczaniu zapotrzebowania cieplnego uwzględniona została konstrukcja budynku, zróżnicowane wymagania co do temperatury w zależności od fazy chowu brojlerów, jak również ciepło wytwarzane przez ptaki.

W celu analizy pracy układu wprowadziłem następujące wskaźniki:

- wskaźnik redukcji emisji CO₂:

$R_{CO_2} = \frac{B_{req} - B_{foss}}{B_{req}} 100 \%$, w którym B_{foss} oznacza emisję CO₂ związaną z wykorzystaniem paliw kopalnych w danym przypadku a B_{req} – emisję w przypadku, kiedy do ogrzewania w całości byłaby wykorzystywana energia z paliw kopalnych,

- wskaźnik wykorzystania energii odnawialnej:

$\beta = \frac{E_{prod}}{E_{aval}} 100 \%$, w którym E_{prod} oznacza energię wyprodukowaną ze źródeł odnawialnych a E_{aval} – dostępną energię odnawialną – energię, która mogłaby zostać wyprodukowana, gdyby nie konieczność odłączenia turbiny lub kolektora z powodu całkowitego zapełnienia magazynu energii,

- ważony wskaźnik redukcji emisji CO₂ – wykorzystania energii odnawialnej:

$\gamma = w_1 R_{CO_2} + w_2 \beta$, gdzie w_1 to waga dla współczynnika redukcji emisji CO₂ a w_2 – waga dla współczynnika wykorzystania energii odnawialnej, $w_1 + w_2 = 1$.

Współczynniki R_{CO_2} oraz β są dla siebie w pewien sposób przeciwstawne: wyższe wartości R_{CO_2} można uzyskać znacznie zwiększając powierzchnię kolektorów czy średnicę turbiny, jednak w takim przypadku będzie często występowała konieczność odłączenia źródeł energii, ponieważ wytworzona energia nie będzie mogła być wykorzystana czy zmagazynowana. W tej sytuacji współczynnik β będzie miał niskie wartości. Z kolei układy niedowymiarowane, o mocy zaniżonej w stosunku do zapotrzebowania, będą miały wysokie wartości parametru β , jednak stopień redukcji emisji CO₂ będzie niewielki. Wskaźnik wykorzystania energii odnawialnych daje pewien wgląd w opłacalność danej konfiguracji systemu. Jego wyższe wartości oznaczają, że układ wykorzysta więcej swoich możliwości wytwarzania energii. Współczynnik γ jest próbą połączenia obydwu parametrów i poprzez możliwość wprowadzenia własnych wag daje możliwość określenia który z parametrów jest istotniejszy dla osoby analizującej pracę danego systemu.

Jak wskazują wyniki symulacji, istotny wpływ na wymienione parametry miała ilość (a co za tym idzie, pojemność cieplna) zasobników energii. Przy mniejszej pojemności, mniejsza ilość energii może być zmagazynowana do wykorzystania w sezonie grzewczym, co sprawia że kocioł na paliwa kopalne będzie musiał pracować częściej, co zwiększa emisję CO₂. Zwiększanie pojemności cieplnej pozwala na zmniejszenie powierzchni kolektorów słonecznych oraz turbiny wiatrowej przy zachowaniu wartości branych pod uwagę wskaźników R_{CO_2} . Przy wykorzystaniu 4 zbiorników niemal całkowitą redukcję emisji można uzyskać stosując kolektory o powierzchni 80 m² lub turbinę o średnicy 20 m.

Wyniki obliczeń parametru γ wskazują, że w analizowanym przypadku dla jednakowych wag ($w_1 = w_2 = 0,5$) wartości powyżej 85 % występują w systemach złożonych z możliwie dużej turbiny wiatrowej i umiarkowanych (do 60 m² w przypadku zastosowania 4 zbiorników) powierzchni kolektorów. Także te wyniki wskazują, że zastosowanie pojemniejszego zasobnika energii umożliwia redukcję powierzchni kolektorów oraz turbiny.

Zaletą wykorzystania wiatru jako źródła energii jest fakt, że w warunkach polskich w okresie zimowym siła wiatru jest większa, co idzie w parze ze wzrostem zapotrzebowania na energię. Z kolei pomimo, że wartość energii słonecznej dostępnej w ciągu roku jest stosunkowo duża, to jednak występuje znaczna nierównomierność podaży tej energii w ciągu roku, co stwarza konieczność jej magazynowania.

W rozpatrywanym przypadku, do ogrzewania budynku hodowlanego potrzeba 70,8 GJ energii w ciągu roku. W tym czasie można wyprodukować ok. 36 720 kg mięsa drobiowego. Przy całkowitym wyeliminowaniu paliw kopalnych i zastosowaniu źródeł odnawialnych można uniknąć emisji 0,11 – 0,22 kg CO₂ (zależnie od rodzaju zastępowanego paliwa) na kilogram żywca. Niższe wartości dotyczą gazu ziemnego a wyższe – węgla kamiennego.

3.1.3.4 Wybór struktury sztucznej sieci neuronowej w modelowaniu stanów dynamicznych ogniw paliwowych typu PEM

Jednym z czynników, który utrudnia szersze wykorzystanie fotowoltaiki jest rozbieżność pomiędzy czasem największego zapotrzebowania oraz czasem największej podaży, zarówno w skali dobowej jak i rocznej. Problem magazynowania energii pozyskanej z energii Słońca był tematem wielu prac (Ahmed et al., 2008; Bayod-Rújula et al., 2013; Mazhari et al., 2011; Shah et al., 2013). Jednym z proponowanych rozwiązań jest wykorzystanie wodoru, który mógłby być wytwarzany w procesie elektrolizy z wykorzystaniem energii słonecznej (Valdés et al., 2012).

Ogniwa paliwowe, jako urządzenia bezpośrednio zamieniające energię chemiczną paliwa na energię prądu stałego, są obiecującą technologią umożliwiającą podwyższenie jakości energii wytwarzanej w rozproszonych systemach wytwórczych, włączając w to fotowoltaikę (Hajizadeh and Golkar, 2010). Wodór wytworzony w czasie nadprodukcji energii może być zmagazynowany i wykorzystany w ogniwach paliwowych do wytworzenia energii w czasie, kiedy energii słonecznej lub wiatru jest zbyt mało w stosunku do zapotrzebowania.

Istnieje wiele sposobów modelowania ogniw paliwowych. Niektóre publikacje prezentują modele oparte na prawach fizycznych i chemicznych, tzw. modele fizyczne (Latha et al., 2013; Sharifi Asl et al., 2010; Xue et al., 2006). Modele takie mają zwykle dobrą dokładność, ale nie są wygodne w użyciu. Głównym powodem jest to, że potrzebują parametrów, które nie są bezpośrednio dostępne. Symulacja zjawisk dynamicznych stanowi jeszcze większe wyzwanie.

Tradycyjne metody modelowania kładą nacisk na modele matematyczne, w których większość stanowią modele oparte na równaniach różniczkowych. Ponieważ znaczna część modeli matematycznych nie daje się rozwiązać w sposób analityczny, metody przybliżone oraz numeryczne stanowią istotną alternatywę (Yang et al., 2013).

Publikacja E przedstawia model matematyczny umożliwiający zamodelowanie statycznej charakterystyki prądowo – napięciowej ogniw paliwowych oraz elektrolizera. Omówiono w niej czynniki wpływające na napięcie ogniwa w zależności od pobieranego prądu, temperatury wewnątrz ogniwa oraz cząstkowego ciśnienia wodoru i tlenu. W równaniach występują współczynniki wyznaczone na drodze empirycznej. Z tego powodu wykorzystanie ich do modelowania pracy konkretnego ogniwa jest utrudnione.

Inna grupa nosi nazwę metody „czarnej skrzynki” (ang. „black box”). Nazwa ta sugeruje, że model traktuje modelowany obiekt jako jednostkę przetwarzającą, dla której należy znaleźć zależność pomiędzy wejściem a wyjściem bez próby odzwierciedlenia zjawisk zachodzących wewnątrz. Inaczej tę grupę można nazwać modelem opartym o dane – model jest tworzony na bazie eksperymentów i pomiarów przeprowadzonych na modelowanym obiekcie.

Jedną z metod tego typu są sztuczne sieci neuronowe. Były one wykorzystywane do modelowania zarówno stanów statycznych jak i dynamicznych ogniw paliwowych (Napoli et al., 2013; Ou and Achenie, 2005; Saengrung et al., 2007).

Publikacja F omawia wyniki badań prowadzonych w celu określenia wpływu parametrów modelu dynamicznego ogniwa paliwowego zrealizowanego w oparciu o sztuczne sieci neuronowe na jego dokładność. Wszystkie spotykane dotąd w literaturze rozwiązania nie były w pełni modelami typu „czarna skrzynka”, ponieważ wymagały podania temperatury wewnętrznej ogniwa jako jeden z parametrów wejściowych – wymagało to stworzenie modelu cieplnego ogniwa, uwzględniającego zarówno wydzielanie ciepła w jego wnętrzu na skutek zachodzących reakcji, jak również oddawanie ciepła do otoczenia. Istotnym osiągnięciem przedstawionego rozwiązania jest fakt, że stworzony model nie wymaga wprowadzenia temperatury wewnętrznej, a jedynie temperatury otoczenia.

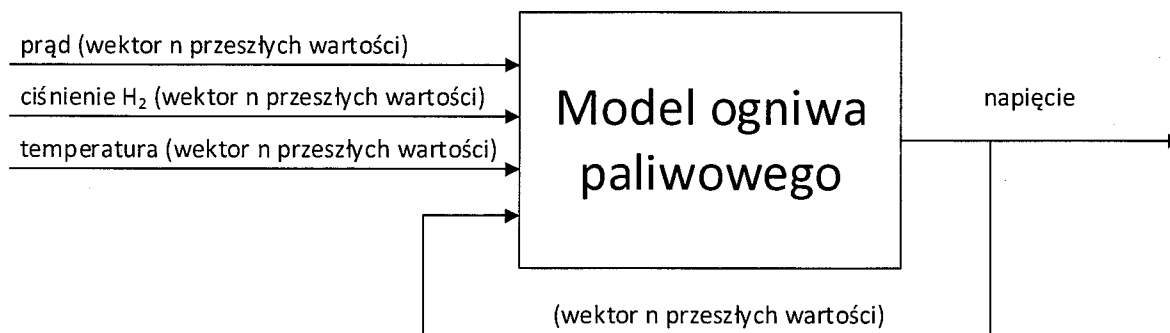
W celu zgromadzenia odpowiedniej ilości danych, przeprowadziłem serię eksperymentów na wodorowym ogniwie paliwowym typu PEM o mocy 12 W, które było umieszczone w komorze klimatycznej. Dokonywane były pomiary temperatury otoczenia ogniwa, jego prądu i napięcia. Zmienne obciążenie było zadawane przy użyciu programowalnego obciążenia elektronicznego. Pomiary były prowadzone z częstotliwością 400 próbek na sekundę. Uzyskano niemal 70 000 punktów danych, które zostały później wykorzystane do utworzenia zestawów danych uczących, testowych i walidacyjnych dla sztucznej sieci neuronowej.

Sieć neuronową zbudowałem w środowisku Matlab. Została skonfigurowana jako sieć z jednokierunkowymi połączeniami i wsteczną propagacją błędów, z jedną warstwą ukrytą. W trakcie prób modelowania zmieniano następujące parametry modelowania oraz przygotowania danych:

- Resampling – serie danych poddawano ponownemu próbkowaniu, polegającemu na pomijaniu określonej ilości punktów danych. W efekcie redukowana jest częstotliwość próbkowania w sygnale wynikowym. Wartość 1 oznacza w praktyce brak ponownego próbkowania.
- Liczba przeszłych punktów danych, która jest wykorzystywana w tworzeniu wektora danych wejściowych.
- Czas trwania sygnału użytego w procesie uczenia sieci.
- Typ funkcji uczącej sieci.
- Typ funkcji wykorzystywanej do wyznaczania błędu sieci w procesie uczenia.
- Liczba neuronów w warstwie ukrytej.

Dodatkowo przeprowadzono próby modelowania bez wykorzystania temperatury zewnętrznej jako jednego z wejść, bez danych ciśnienia oraz bez uwzględniania obydwu tych parametrów.

Przeptyw danych w modelu został przedstawiony na poniższym rysunku.



W wyniku symulacji otrzymałem sześciowymiarową tablicę zawierającą błąd średniokwadratowy symulacji. Sprawdziłem 960 różnych kombinacji parametrów modelowania. W tej sytuacji dużym wyzwaniem było przedstawienie otrzymanych wyników. Zostały one zilustrowane w postaci diagramów, na których znakiem „x” oznaczono kombinacje dające błędy poniżej określonego progu.

Po analizie uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski:

- W przypadkach, w których nie uwzględniano temperatury otoczenia błędy symulacji były wyższe niż w pozostałych przypadkach. Oznacza to brak podstaw do pominięcia tego wejścia.
- W przypadkach, kiedy nie uwzględniano ciśnienia wodoru, błędy były tylko nieznacznie wyższe w porównaniu do modelu, w którym uwzględniono zarówno temperaturę jak i ciśnienie wodoru. Wynika to jednak najprawdopodobniej z faktu, że obserwowane zmiany ciśnienia były niewielkie.
- Wyższe częstotliwości próbkowania dają lepsze wyniki w porównaniu do niższych częstotliwości.
- Zazwyczaj w sytuacji kiedy wektor danych wejściowych był tworzony tylko z jednej przeszłej wartości dokładność była najwyższa.
- Zwiększanie czasu trwania próbki użytej do uczenia sieci powyżej 100 sekund zwykle nie przynosi istotnej poprawy dokładności, za wyjątkiem przypadku, kiedy nie jest uwzględniana temperatura otoczenia – w tej sytuacji potrzeba próbki o długości co najmniej 150 s dla uzyskania najlepszych rezultatów.
- Funkcja szkolenia w postaci bayesowskiej propagacji wstecznej zwykle daje wyższą dokładność niż algorytm Levenberga-Marquardta.
- Należy stosować sieci neuronowe z co najmniej pięcioma neuronami w warstwie ukrytej.

Zarówno zamieszczone przykładowe przebiegi napięcia i prądu w czasie jak i wykresy regresji wskazują, że odpowiednio skonfigurowana sztuczna sieć neuronowa poprawnie modeluje stany dynamiczne ogniwa paliwowego.

Uzyskane wyniki umożliwiają zbudowanie stosunkowo prostego modelu, niewymagającego szczegółowych danych fizycznych danego ogniwa w przypadku, kiedy przykładowe dane mogą być uzyskane z rzeczywistego układu za pomocą prostego eksperymentu. Model taki może być wykorzystany do symulacji stanów dynamicznych ogniwa paliwowego typu PEM jako części rolniczego systemu zarządzania energią pozyskaną ze źródeł odnawialnych.

3.1.3.5 Określenie wpływu superkondensatora jako krótkookresowego magazynu energii na właściwości rolniczego układu nawadniającego zasilanego energią słoneczną

Ze względu na możliwość produkcji energii elektrycznej w obszarach odległych od infrastruktury elektroenergetycznej, systemy fotowoltaiczne znajdują coraz szersze zastosowanie w produkcji rolniczej. Główne obszary zastosowania obejmują nawodnienie, chłodnictwo i suszenie produktów rolnych (Mekhilef et al., 2013). Dodatkowe nawadnianie zwiększa opłacalność produkcji roślinnej (Baptista et al., 2014; Hanson and May, 2004; Hansona et al., 1997; Rajak et al., 2006). Woda pitna jest też konieczna w chowie zwierząt.

Najczęściej wykorzystywanymi układami są te z bezpośrednio dołączonym silnikiem prądu stałego, z falownikiem i silnikiem indukcyjnym, z baterią akumulatorów oraz falownikiem i silnikiem indukcyjnym (Chandel et al., 2015). Często zawierają także układ śledzący maksymalną moc generatora fotowoltaicznego, tzw. MPPT (ang. Maximum Power Point Tracker). Aby obniżyć koszt układu oraz zwiększyć jego niezawodność, fotowoltaiczne systemy pompujące najczęściej nie zawierają baterii akumulatorów (Mekhilef et al., 2013). W nowoczesnych systemach pompowych tradycyjne silniki prądu stałego zastępowane są silnikami bezszczotkowymi prądu stałego, w których mechaniczny komutator został zastąpiony elektronicznym układem przełączającym.

Superkondensatory przechowują energię poprzez separację nośników ładunku na dwóch porowatych elektrodach z węgla aktywnego rozdzielonych cienką warstwą separatora. W przeciwieństwie do baterii chemicznych mają trwałość rzędu setek tysięcy cykli. Charakteryzują się gęstością energii na poziomie do 7 W h kg^{-1} i gęstością mocy do 3 kW kg^{-1} (Atmaja and Amin, 2015). W systemach fotowoltaicznych mogą być wykorzystywane do krótkookresowego magazynowania energii. Z pomocą prostego sterownika przełączającego, superkondensator może wydłużyć działanie układu o okresy o niskim nasłonecznieniu w taki sposób, że w sytuacji kiedy napięcie spada poniżej określonego poziomu, obciążenie elektryczne będzie rozłączone aby generator fotowoltaiczny mógł naładować superkondensator. Kiedy napięcie przekroczy określony poziom, obciążenie zostanie ponownie dołączone. W ten sposób będzie możliwe okresowe zasilanie obciążenia odpowiednim napięciem nawet w czasie, kiedy nasłonecznienie jest niskie. Potencjalny obszar zastosowania układów tego typu to zasilanie pomp i wentylatorów.

Publikacja G omawia analizę pracy systemu pompowego zasilanego z układu fotowoltaicznego z silnikiem bezszczotkowym prądu stałego. Wziąłem pod uwagę cztery konfiguracje: bezpośrednie zasilanie pompy z generatora fotowoltaicznego, układ z dołączonym urządzeniem MPPT, układ z superkondensatorem, układ z superkondensatorem i MPPT. Pracę systemu zamodelowałem w środowisku Matlab/Simulink. Celem badań było określenie wpływu, jaki zastosowana konfiguracja ma na ilość wody, którą można wypompować. Dodatkowo, uwzględniłem cztery możliwe konfiguracje generatora fotowoltaicznego: z

pojedynczym modułem, z dwoma modułami połączonymi szeregowo, z trzema modułami połączonymi szeregowo i z dwoma gałęziami składającymi się z dwóch modułów połączonymi szeregowo (w sumie cztery moduły).

Układ silnik-pompa został zamodelowany poprzez wykorzystanie tabeli konwersji (ang. look-up table) utworzonej na podstawie danych otrzymanych od producenta. Aby było możliwe porównanie różnych konfiguracji układu zasilającego, założyłem, że system pompowy pracuje ze stałym ciśnieniem, które można zinterpretować jako stała wysokość podnoszenia. Wyjątkiem jest symulacja pracy układu w dwóch przykładowych dniach (dzień pochmurny i słoneczny), gdzie zamodelowano zarówno ciśnienie statyczne, jak i dynamiczne wynikające z oporów przepływu cieczy przez rurociąg.

W celu dokonania oceny pracy układu w poszczególnych konfiguracjach wprowadziłem własny zmodyfikowany wskaźnik wydajności:

$$\xi = \frac{P_{hydr} S}{P_{nPV} S_{ref}} 100 \%,$$

w którym S oznacza nasłonecznienie w $W m^{-2}$, S_{ref} – nasłonecznienie odniesienia (zwykle $1000 W m^{-2}$), P_{nPV} – znamionową moc generatora fotowoltaicznego a moc hydrauliczna jest liczona jako:

$$P_{hydr} = \rho_{H_2O} g Q H.$$

ρ_{H_2O} oznacza gęstość wody, g – przyspieszenie ziemskie, Q – przepływ wody a H – wysokość podnoszenia.

Zdefiniowanie tego współczynnika w opisany sposób, poprzez uwzględnienie mocy promieniowania słonecznego, pozwala na łatwe porównanie pomiędzy różnymi konfiguracjami układu generator fotowoltaiczny – silnik – pompa, pracującego przy różnych wysokościach podnoszenia i różnych wartościach nasłonecznienia.

Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowanie urządzenia śledzącego maksymalną moc generatora fotowoltaicznego pozwala na pracę układu przy niskim nasłonecznieniu. W układzie z superkondensatorem, praca także rozpoczyna się przy niskim nasłonecznieniu (nawet od $50 W m^{-2}$).

Analizując wartość współczynnika ξ można sformułować następujące wnioski:

- Większe wartości ξ występują dla niskich wysokości podnoszenia kiedy wykorzystywany jest mały generator (1 lub 2 moduły).
- Układ z superkondensatorem i urządzeniem MPPT jest w większości przypadków bardziej wydajny niż układ z samym superkondensatorem.
- Układ z urządzeniem MPPT jest w większości przypadków wydajniejszy niż układ z bezpośrednim połączeniem silnika z generatorem fotowoltaicznym.
- Zastosowanie superkondensatora w większości przypadków zwiększa wydajność w porównaniu z systemem z bezpośrednio dołączonym obciążeniem.

Wyniki uzyskane z symulacji pracy układu w różnych konfiguracjach w dwóch przykładowych dniach wskazują, że:

- W dzień słoneczny wypompowana objętość wody nie jest w większości przypadków istotnie wyższa dla bardziej rozbudowanych układów (z urządzeniem MPPT, z superkondensatorem czy urządzeniem MPPT i superkondensatorem) niż dla najprostszego układu (z silnikiem połączonym bezpośrednio z generatorem fotowoltaicznych).
- Zastosowanie urządzenia MPPT zwykle daje najlepsze wyniki, pozwalając na rozpoczęcie pracy przy niskim nasłonecznieniu i na pompowanie wody na większe wysokości, szczególnie w pochmurny dzień.

3.1.3.6 Podsumowanie

W zaprezentowanym osiągnięciu naukowym wykorzystałem wybrane techniki numeryczne w modelowaniu pracy wybranych urządzeń przetwarzających energię Słońca i wiatru oraz magazynujących. Ponadto, praktycznym rezultatem przedstawionych badań stanowiącym wkład w rozwój inżynierii rolniczej było:

- opracowanie metod przygotowania nasłonecznienia jako danych wejściowych do modelowania układów pozyskujących energię Słońca wykorzystujących transformację falkową oraz empiryczną dekompozycję modów,
- określenie dokładności wybranych modeli wytwarzania energii przez turbiny wiatrowe,
- określenie możliwości redukcji emisji CO₂ poprzez wykorzystanie turbiny wiatrowej oraz kolektorów słonecznych do pozyskiwania energii dla ogrzewania budynków hodowlanych na przykładzie kurnika, jak również sprawdzenie możliwości wzajemnej współpracy tych źródeł,
- określenie wpływu parametrów modelu ogniwa paliwowego typu PEM zrealizowanego z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych na dokładność modelowania stanów dynamicznych tego urządzenia,
- określenie, jak konfiguracja generatora fotowoltaicznego oraz zastosowanie dodatkowych urządzeń, w tym krótkookresowego magazynu energii, wpływa na wydajność układu pompującego wodę.

Powyższe rezultaty stanowią podstawę do wykorzystania nowych źródeł energii w inżynierii rolniczej, ponieważ nowe środki techniczne powodują konieczność zmiany istniejących rozwiązań.

Wykorzystane modele charakteryzują się różnym stopniem skomplikowania oraz różną dokładnością: wykorzystałem proste procedury obliczeniowe bazujące na przybliżaniu charakterystyk równaniami wielomianowymi, tabelę konwersji, sztuczną sieć neuronową. Zbudowałem kompletne modele obiektów: kurnika oraz systemu pompowego w celu analizy ich pracy oraz ustalenia ich właściwości w różnych konfiguracjach.

Biorąc pod uwagę cel modelowania, nie zawsze stosowanie bardzo zaawansowanych technik jest uzasadnione, gdy weźmie się pod uwagę z jednej strony wymagania co do

oprogramowania i sprzętu komputerowego a z drugiej wymaganą dokładność oraz prostotę i niezawodność stosowanego modelu. Dlatego też oprócz technik bardziej zaawansowanych, wymagających specjalistycznego oprogramowania, jak transformata falkowa, empiryczna dekompozycja modów czy sztuczne sieci neuronowe użyte zostały modele uproszczone, wykorzystujące przybliżanie charakterystyki za pomocą wielomianu, czy modele energetyczne biorące pod uwagę sprawność energetyczną, demonstrując w ten sposób ich przydatność w modelowaniu odnawialnych źródeł energii.

Innowacyjność omawianych rozwiązań polega w szczególności na tym, że:

- Zastosowałem nowoczesne techniki takie jak transformata falkowa czy empiryczna dekompozycja modów do obróbki danych nasłonecznienia. Techniki te bywają wykorzystywane w prognozowaniu natężenia promieniowania (Bengulescu et al., 2016; Cao and Lin, 2008a, 2008b; Urraca et al., 2016), nie występują publikacje omawiające ich wykorzystanie w przygotowaniu danych.
- Zastosowałem magazyny energii w celu poprawy właściwości urządzeń pozyskujących energię Słońca i wiatru.
- Wprowadziłem niestandardowe wskaźniki, takie jak wskaźnik wykorzystania energii odnawialnej β , ważony wskaźnik redukcji emisji CO₂ – wykorzystania energii odnawialnej γ , zmodyfikowany wskaźnik wydajności ξ . Zastosowanie tych wskaźników istotnie ułatwia ocenę pracy układów pozyskujących energię ze źródeł odnawialnych.
- Wykazałem, że jest możliwe zbudowanie poprawnie działającego modelu ogniwa paliwowego typu PEM wykorzystującego sztuczne sieci neuronowe wyłącznie na bazie wielkości „zewnętrznych” do ogniwa. Prezentowane dotąd w literaturze modele do prawidłowego działania potrzebowały temperatury wewnętrznej ogniwa, co utrudniało budowę modelu.

3.1.4 Bibliografia

- Ahmed, N.A., Miyatake, M., Al-Othman, A.K., 2008. Power fluctuations suppression of stand-alone hybrid generation combining solar photovoltaic/wind turbine and fuel cell systems. *Energy Convers. Manag.* 49, 2711–2719. doi:10.1016/j.enconman.2008.04.005
- Ashrae, 2009. 2009 Ashrae Handbook: Fundamentals, I-P Edition, Har/Cdr edition. ed. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- Atmaja, T.D., Amin, 2015. Energy Storage System Using Battery and Ultracapacitor on Mobile Charging Station for Electric Vehicle. *Energy Procedia*, 2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA) 2014 Sustainable Energy for Green Mobility 68, 429–437. doi:10.1016/j.egypro.2015.03.274
- Baptista, F., Silva, L., de Visser, C., Gołaszewski, J., Meyer-Aurich, A., Briassoulis, D., Mikkola, H., Murcho, D., Marques, C., da Silva, J., Rosado, M., 2014. Energy efficiency in agriculture, in: *Sustainable Agriculture – Poland and Portugal*. University of Life Sciences, Lublin, Poland and University of Évora, Portugal.
- Bayod-Rújula, Á.A., Haro-Larrodé, M.E., Martínez-Gracia, A., 2013. Sizing criteria of hybrid photovoltaic–wind systems with battery storage and self-consumption considering

- interaction with the grid. *Sol. Energy* 98, Part C, 582–591. doi:10.1016/j.solener.2013.10.023
- Bengulescu, M., Blanc, P., Wald, L., 2016. Characterizing Temporal Variability in Measurements of Surface Solar Radiation and its Dependence on Climate. *Energy Procedia* 97, 164–171. doi:10.1016/j.egypro.2016.10.045
- Cao, J., Lin, X., 2008a. Application of the diagonal recurrent wavelet neural network to solar irradiation forecast assisted with fuzzy technique. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 21, 1255–1263. doi:10.1016/j.engappai.2008.02.003
- Cao, J., Lin, X., 2008b. Study of hourly and daily solar irradiation forecast using diagonal recurrent wavelet neural networks. *Energy Convers. Manag.* 49, 1396–1406. doi:10.1016/j.enconman.2007.12.030
- Chandel, S.S., Nagaraju Naik, M., Chandel, R., 2015. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 49, 1084–1099. doi:10.1016/j.rser.2015.04.083
- Fleureau, J., Kachenoura, A., Albera, L., Nunes, J.-C., Senhadji, L., 2011. Multivariate empirical mode decomposition and application to multichannel filtering. *Signal Process., Advances in Multirate Filter Bank Structures and Multiscale Representations* 91, 2783–2792. doi:10.1016/j.sigpro.2011.01.018
- Hajizadeh, A., Golkar, M.A., 2010. Control of hybrid fuel cell/energy storage distributed generation system against voltage sag. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 32, 488–497. doi:10.1016/j.ijepes.2009.09.015
- Hanson, B., May, D., 2004. Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability. *Agric. Water Manag.* 68, 1–17. doi:10.1016/j.agwat.2004.03.003
- Hansona, B.R., Schwankl, L.J., Schulbach, K.F., Pettygrove, G.S., 1997. A comparison of furrow, surface drip, and subsurface drip irrigation on lettuce yield and applied water. *Agric. Water Manag.* 33, 139–157. doi:10.1016/S0378-3774(96)01289-9
- Huang, N.E., Shen, S.S., 2005. *Hilbert-Huang Transform and Its Applications*. World Scientific.
- Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.C., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C.C., Liu, H.H., 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. R. Soc. Lond. Math. Phys. Eng. Sci.* 454, 903–995. doi:10.1098/rspa.1998.0193
- IEA, 2016. *Tracking Clean Energy Progress 2016. Energy Technology Perspectives 2016 Excerpt IEA Input to the Clean Energy Ministerial*.
- Jafarian, M., Ranjbar, A.M., 2010. Fuzzy modeling techniques and artificial neural networks to estimate annual energy output of a wind turbine. *Renew. Energy* 35, 2008–2014. doi:10.1016/j.renene.2010.02.001
- Latha, K., Vidhya, S., Umamaheswari, B., Rajalakshmi, N., Dhathathreyan, K.S., 2013. Tuning of PEM fuel cell model parameters for prediction of steady state and dynamic performance under various operating conditions. *Int. J. Hydrog. Energy* 38, 2370–2386. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.11.102
- Lee, C.W., Zhong, J., 2014. Top down strategy for renewable energy investment: Conceptual framework and implementation. *Renew. Energy* 68, 761–773. doi:10.1016/j.renene.2014.03.015
- Leigh, J.R., 2004. *Control Theory (2nd Edition)*.
- Lin, H., Jiao, H.C., Buyse, J., Decuyper, E., 2006. Strategies for preventing heat stress in poultry. *Worlds Poult. Sci. J.* 62, 71–86. doi:10.1079/WPS200585

- Lund, H., 2007. Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy*, Third Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems 32, 912–919. doi:10.1016/j.energy.2006.10.017
- Lydia, M., Kumar, S.S., Selvakumar, A.I., Prem Kumar, G.E., 2014. A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 30, 452–460. doi:10.1016/j.rser.2013.10.030
- Mathew, S., 2006. *Wind energy*. Springer-Verlag, New York, NY.
- Mazhari, E., Zhao, J., Celik, N., Lee, S., Son, Y.-J., Head, L., 2011. Hybrid simulation and optimization-based design and operation of integrated photovoltaic generation, storage units, and grid. *Simul. Model. Pract. Theory* 19, 463–481. doi:10.1016/j.simpat.2010.08.005
- McMichael, A.J., Powles, J.W., Butler, C.D., Uauy, R., 2007. Food, livestock production, energy, climate change, and health. *The Lancet* 370, 1253–1263. doi:10.1016/S0140-6736(07)61256-2
- Mekhilef, S., Faramarzi, S.Z., Saidur, R., Salam, Z., 2013. The application of solar technologies for sustainable development of agricultural sector. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18, 583–594. doi:10.1016/j.rser.2012.10.049
- Michalak, P., Zimny, J., 2011. Wind energy development in the world, Europe and Poland from 1995 to 2009; current status and future perspectives. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 2330–2341. doi:10.1016/j.rser.2011.02.008
- Napoli, G., Ferraro, M., Sergi, F., Brunaccini, G., Antonucci, V., 2013. Data driven models for a PEM fuel cell stack performance prediction. *Int. J. Hydrog. Energy* 38, 11628–11638. doi:10.1016/j.ijhydene.2013.04.135
- Ou, S., Achenie, L.E.K., 2005. A hybrid neural network model for PEM fuel cells. *J. Power Sources* 140, 319–330. doi:10.1016/j.jpowsour.2004.08.047
- Rajak, D., Manjunatha, M.V., Rajkumar, G.R., Hebbara, M., Minhas, P.S., 2006. Comparative effects of drip and furrow irrigation on the yield and water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in a saline and waterlogged vertisol. *Agric. Water Manag.* 83, 30–36. doi:10.1016/j.agwat.2005.11.005
- Saengrung, A., Abtahi, A., Zilouchian, A., 2007. Neural network model for a commercial PEM fuel cell system. *J. Power Sources* 172, 749–759. doi:10.1016/j.jpowsour.2007.05.039
- Sarniak, M., 2011. The testing of energy efficiency of a prototype hybrid solar panel. *Teka Kom. Motoryz. Energ. Rol.* 11.
- Schlechtingen, M., Santos, I.F., Achiche, S., 2013. Using Data-Mining Approaches for Wind Turbine Power Curve Monitoring: A Comparative Study. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 4, 671–679. doi:10.1109/TSTE.2013.2241797
- Shah, R., Mithulanathan, N., Bansal, R.C., 2013. Oscillatory stability analysis with high penetrations of large-scale photovoltaic generation. *Energy Convers. Manag.* 65, 420–429. doi:10.1016/j.enconman.2012.08.004
- Sharifi Asl, S.M., Rowshanzamir, S., Eikani, M.H., 2010. Modelling and simulation of the steady-state and dynamic behaviour of a PEM fuel cell. *Energy* 35, 1633–1646. doi:10.1016/j.energy.2009.12.010
- TEAGASC, 2011. *Energy Use in Agriculture*.
- Urraca, R., Antonanzas, J., Alia-Martinez, M., Martinez-de-Pison, F. j., Antonanzas-Torres, F., 2016. Smart baseline models for solar irradiation forecasting. *Energy Convers. Manag.* 108, 539–548. doi:10.1016/j.enconman.2015.11.033

- Üstüntaş, T., Şahin, A.D., 2008. Wind turbine power curve estimation based on cluster center fuzzy logic modeling. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 96, 611–620. doi:10.1016/j.jweia.2008.02.001
- Valdés, R., Rodríguez, L.R., Lucio, J.H., 2012. Procedure for optimal design of hydrogen production plants with reserve storage and a stand-alone photovoltaic power system. *Int. J. Hydrog. Energy* 37, 4018–4025. doi:10.1016/j.ijhydene.2011.11.133
- Xue, X.D., Cheng, K.W.E., Sutanto, D., 2006. Unified mathematical modelling of steady-state and dynamic voltage–current characteristics for PEM fuel cells. *Electrochimica Acta* 52, 1135–1144. doi:10.1016/j.electacta.2006.07.011
- Yang, X.-S., Koziel, S., Leifsson, L., 2013. Computational Optimization, Modelling and Simulation: Recent Trends and Challenges. *Procedia Comput. Sci.*, 2013 International Conference on Computational Science 18, 855–860. doi:10.1016/j.procs.2013.05.250

4 OMÓWIENIE DOROBKU NAUKOWEGO NIE WCHODZĄCEGO W SKŁAD OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO WYMIENIONEGO W PUNKCIE 3

4.1 DOROBEK NAUKOWY PRZED UZYSKANIEM STOPNIA NAUKOWEGO DOKTORA

Po uzyskaniu dyplomu magistra inżyniera i rozpoczęciu pracy na stanowisku asystenta skierowałem swoje zainteresowania naukowe w kierunku wykorzystania energii słonecznej. Rezultatem było powstanie czterech wymienionych poniżej publikacji oraz udział w trzech konferencjach naukowych, w tym dwóch zagranicznych.

Jednocześnie moje badania prowadzone pod kierunkiem prof. dra hab. Tadeusza Skoczковского zaowocowały w roku 1999 obroną rozprawy doktorskiej pt. „Analiza pracy generatorów fotowoltaicznych zasilających układy napędowe z silnikami prądu stałego”. Na realizację rozprawy doktorskiej zostało we wrześniu 1997 roku przyznane finansowanie z Komitetu Badań Naukowych.

Publikacje wydane w tym okresie to:

1. Ocena możliwości wykorzystania energii słonecznej do celów rolniczych w regionie lubelskim. JACEK KAPICA. *Zesz. Probl. Postęp. Nauk Rol.* 1996 z. 425 t. 2 s. 89-94,
2. Some technical aspects of coupling photovoltaic arrays with DC motors. [AUT.] JACEK KAPICA. W: Rational use of renewable energy sources in the agriculture in connection with the environmental. International Conference Budapest, Hungary. Budapest, 1996, 2-8 June., 1996. - S. 45,
3. Systemy fotowoltaiczne i ich zastosowanie. JACEK KAPICA. *Przegląd Elektrotechniczny.* 11/1996.
4. The influence of selection of the solar cell's model on the accuracy of calculation of the current-voltage characteristics. Jacek Kapica. *Proceedings of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.* Vienna 1998.

4.2 DOROBEK NAUKOWY PO UZYSKANIU STOPNIA NAUKOWEGO DOKTORA

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora moja praca naukowa przebiegała w kilku kierunkach. Najważniejszym z nich były prace nad modelowaniem i właściwościami urządzeń pozyskujących energię ze źródeł odnawialnych oraz wykorzystujących nowoczesne magazyny energii. Poza pracami stanowiącymi prezentowane osiągnięcie naukowe, tematykę tę poruszają artykuły: B1, B2, B9, B13, B12, B22, B17, B19, C1, C2.

Publikacja A1 omawia zagadnienia związane z usuwaniem amoniaku z obornika drobiowego z wykorzystaniem glinokrzemianów. Właściwości absorpcyjne amonu bentonitu sodowego i zeolitu sodu potwierdzone w warunkach *ex situ*. Najbardziej znacząca redukcja poziomu amoniaku w odniesieniu do próbki kontrolnej zaobserwowano dla 2 % bentonitu i 1 % zeolitu. Średnia redukcja w całym eksperymencie wahała się od 26,41 % do 29,04 %.

Celem pracy A2 była ocena narażenia kierowców na mikrobiologiczne zanieczyszczenie powietrza (bakterie i grzyby) w autobusach. Powietrze w pojazdach komunikacji publicznej zostało zbadane jesienią, zimą i wiosną. Aby ocenić narażenie kierowców na bioaerozole, pobierano próbki powietrza i zbadano całkowitą liczbę bakterii i grzybów w powietrzu, liczbę mezofilnych bakterii tlenowych określonych przez liczbę jednostek tworzących kolonie (CFU) na 1 m³ powietrza. Wyniki badań wskazują, że transport publiczny jako miejsce pracy może być uważany za znaczące zagrożenie dla zdrowia.

Kolejnym obszarem było oznaczanie składu chemicznego, w tym zanieczyszczeń produktów spożywczych. Publikacje B3, B4 omawiają zastosowanie czujnika typu ISFET w przemyśle spożywczym. Tranzystor polowy czuły na jony (ISFET – Ion Sensitive Field Effect Transistor) umożliwia pomiar koncentracji jonów w roztworach wodnych. Tranzystor taki w wykonaniu podstawowym jest czuły na stężenie jonów wodorowych (pH). Poprzez naniesienie odpowiednio wykonanej membrany na obszar bramkowy ISFET'a, można uczulić ten przyrząd na stężenie innych substancji. W zależności od zastosowanego materiału membrany, czujniki te mogą wykrywać obecność jonów różnych pierwiastków a także związków chemicznych, w tym pestycydów. Ze względu na to, że biosensory tego typu są urządzeniami elektronicznymi o stosunkowo długim czasie życia, krótkim czasie odpowiedzi, mogą znaleźć szerokie zastosowanie w przemyśle rolno-spożywczym. W artykule B8 omówiono wyniki prac nad możliwością wykorzystania automatycznego systemu rozpoznawania obrazu do określenia stopnia zanieczyszczenia mikrobiologicznego produktów spożywczych oraz przedstawiono wytyczne umożliwiające prawidłowe wykonanie analizy obrazu.

W ramach współpracy z Kliniką Psychiatrii Uniwersytetu Medycznego w Lublinie, Kliniką Chorób Wewnętrznych Zwierząt Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie oraz z doktorem Andym R. Eugene z Division of Clinical Pharmacology, Department of Molecular Pharmacology and Experimental Therapeutics, Mayo Clinic, Rochester, Minnesota, USA prowadziłem badania nad analizą numeryczną sygnałów bioelektrycznych, w szczególności EKG oraz EEG. Artykuł B11 omawia możliwość zastosowania entropii wieloskalowej w analizie sygnału EEG. Jako metoda oparta na entropii, mierzy ona stopień złożoności danego sygnału. Cecha wieloskalowości daje możliwość oceny funkcjonowania ludzkiego mózgu w różnych zakresach

częstotliwości sygnału EEG. Złożoność czynności bioelektrycznej mózgu może odzwierciedlać zdolność systemu do reakcji na zmiany zachodzące w otoczeniu i dlatego może być markerem choroby. Artykuły B14, B15 i B16 prezentują wyniki obrazowania aktywności bioelektrycznej mózgu w celu wyznaczenia cech tej aktywności charakterystycznych dla analizowanych jednostek chorobowych (schizofrenia, anoreksja, depresja, choroba dwubiegunowa). Oprócz istotnych dla lekarzy wniosków wynikających z tych publikacji, z technicznego punktu widzenia ważny jest wniosek, że zastosowanie analizy numerycznej sygnału EEG może w wielu wypadkach zastąpić kosztowne badania prowadzone metodą czynnościowego rezonansu magnetycznego.

Tematyka numerycznej analizy sygnału EKG prezentowana była w wystąpieniach prezentowanych na konferencjach naukowych (C9, C10, C14).

W publikacji B10 przedstawiono sposób analizy zmienności cen energii za pomocą entropii próbki (ang. sample entropy), która jest wykorzystywana do oznaczania stopnia złożoności zestawu danych (np. szeregu czasowego). Metoda ta została użyta do zweryfikowania hipotezy o efektywności rynku (ang. efficient market hypothesis) na przykładzie cen ropy naftowej.

Pozostałe artykuły dotyczą zastosowania nowoczesnych narzędzi informatycznych w inżynierii rolniczej.

Publikacja B5 omawia zastosowanie programu Multisim do analizy pracy układów energoelektronicznych stosowanych w rolnictwie. Zaprezentowano przykłady praktycznego wykorzystania programu symulacyjnego oraz przedstawiono korzyści i ograniczenia, jakie niesie ze sobą jego stosowanie. W artykule B6 omówiono wykorzystanie środowiska LabView do tworzenia instrumentów wirtualnych wspomagających pomiary w inżynierii rolniczej. LabView jest środowiskiem programowym wspomagającym tworzenie wirtualnych instrumentów pomiarowych. Umożliwia pobieranie danych pomiarowych, ich przetwarzanie oraz zapisywanie, a także sterowanie procesem badawczym. Opracowanie B7 szczegółowo omawia zastosowanie analizy częstotliwościowej sygnału napięciowego lub prądowego alternatora stosowanego w pojazdach rolniczych do wspomagania diagnostyki uszkodzeń elektrycznych. Stworzona metoda umożliwia analizę częstotliwościową sygnału przy zastosowaniu funkcji filtrujących i uśredniających. Jest wygodnym narzędziem umożliwiającym sprawdzenie zależności pomiędzy uszkodzeniami danej maszyny elektrycznej a zawartością wyższych harmonicznymi w napięciu wyjściowym lub natężeniu prądu danego urządzenia.

Wykonałem recenzje pięciu artykułów dla czasopism anglojęzycznych wydawanych przez OMICS International, trzech dla czasopisma Solar Energy (IF 4.018) oraz jednego artykułu dla czasopisma Journal of Renewable and Sustainable Energy (IF 1.135).

5 POZOSTAŁA DZIAŁALNOŚĆ OPIEKUŃCZA, ORGANIZACYJNA, POPULARYZATORSKA I DYDAKTYCZNA

5.1 OPIEKA NAD STUDENTAMI I MŁODYMI PRACOWNIKAMI NAUKI

W dniu 23.10.2015 Rada Wydziału Inżynierii Produkcji Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie podjęła uchwałę o wszczęciu przewodu doktorskiego dr inż. Izabeli Piaseckiej jednocześnie powierzając mi rolę promotora pomocniczego. Tytuł rozprawy doktorskiej brzmi „Oddziaływanie procesorów fotowoltaicznych na środowisko naturalne”. Obrona odbyła się w dniu 25 maja 2016 roku a praca została uhonorowana wyróżnieniem.

Jestem także promotorem 8 prac inżynierskich i 7 magisterskich. Ponadto recenzowałem 12 prac inżynierskich oraz 2 magisterskie.

W latach 2010-2013 uczestniczyłem w pracach Koła Naukowego Internistów na Wydziale Medycyny Weterynaryjnej UP w Lublinie. Owocem tej współpracy są wystąpienia studentów na seminariach kół naukowych, prezentujących wyniki badań prowadzonych pod moim kierunkiem (C14, C15).

5.2 DZIAŁALNOŚĆ DYDAKTYCZNA

Od początku mojego zatrudnienia w Uniwersytecie Przyrodniczym w Lublinie (poprzednio Akademii Rolniczej) częścią moich obowiązków służbowych była działalność dydaktyczna. W pierwszym okresie prowadziłem ćwiczenia laboratoryjne z przedmiotu *Elektrotechnika i elektronika*.

Po roku 2010 opracowałem program zajęć (zarówno wykładów jak i ćwiczeń) i prowadziłem następujące przedmioty:

- *Metrologia elektroniczna w geodezji* na kierunku Geodezja na Wydziale Inżynierii Produkcji,
- *Ogniwa paliwowe i fotowoltaiczne* na kierunku Technika Rolnicza i Leśna, specjalność Odnawialne źródła energii i ekoenergetyka na Wydziale Inżynierii Produkcji,
- *Techniki w energetyce alternatywnej* na studiach II^o na kierunku Inżynieria Środowiska, Wydział Agrobiotechnologii,
- *Alternatywne napędy w pojazdach* na studiach II^o na kierunku Transport na Wydziale Inżynierii Produkcji.

5.3 DZIAŁALNOŚĆ POPULARYZATORSKA

W latach 2012-2014 przygotowałem 4 prezentacje w ramach Lubelskiego Festiwalu Nauki.

6 PODSUMOWANIE DOROBKU NAUKOWEGO

W okresie po uzyskaniu stopnia naukowego byłem autorem lub współautorem 44 publikacji oraz doniesień konferencyjnych.

Z tej liczby 29 publikacji zostało opublikowanych w recenzowanych czasopismach krajowych lub zagranicznych. W tej liczbie jestem jedynym autorem 13 a pierwszym autorem 7 artykułów.

Tabela 1. Zestawienie publikacji według czasopism, w których zostały opublikowane.

L.p.	Nazwa czasopisma	Liczba publikacji	Punkty MNiSW w roku wydania (łącznie)	Współczynnik Impact Factor według roku wydania
1.	Journal of Environmental Management	1	35	4,010
2.	Agricultural Systems	1	50	2,867
3.	Journal of Occupational and Environmental Hygiene	1	20	1,200
4.	Journal of Renewable and Sustainable Energy	1	20	1,135
5.	Econtechmod. An International Quarterly Journal on Economics of Technology and Modelling Processes	3	36	-
6.	Logistyka	3	20	-
7.	TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa	5	30	-
8.	Inżynieria Rolnicza	9	42	-
9.	Hospital Chronicles	1	5	-
10.	Broad Research in Artificial Intelligence Neuroscience	2	10	-
11.	Current Problems of Psychiatry	1	3	-

Tabela 2. Zestawienie publikacji według kategorii

L.p.	Kategoria czasopisma	Liczba publikacji	Punkty MNiSW w roku wydania (łącznie)	Współczynnik Impact Factor według roku wydania
1.	Czasopisma indeksowane w bazie JCR, dla których określono współczynnik Impact Factor	4	125	9,212
2.	Czasopisma z listy B MNiSW	22	131	-
3.	Artykuły wydane w języku innym niż polski o objętości co najmniej 0,5 arkusza wydawniczego, zamieszczone w zagranicznym recenzowanym czasopiśmie naukowym niewymienionym w wykazie czasopism naukowych	3	15	-
4.	Doniesienia konferencyjne i inne publikacje	15	0	-
Razem:		44	271	9,212

Według bazy Google Scholar moje prace były cytowane łącznie 22 razy a indeks Hirscha wynosi 2.

Jacek Kapica