

Dr inż. Piotr Paplicki  
Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych  
Wydział Elektryczny  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Szczecin, dnia 10.05.2017r.

### AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: Piotr Paplicki
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.
  - 2001 – tytuł magistra inżyniera elektrotechniki; specjalność: przetwarzanie i użytkowanie energii elektrycznej, absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Szczecińskiej praca pt. „Projekt układu napędowego pojazdu podwodnego z wykorzystaniem śrub kontrrotujących”, promotor prof. dr hab. inż. Anatolij Afonin.
  - 2005 – stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika, Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej; praca pt. „Elektromechaniczne przetworniki energii z aktywnymi elementami o ruchu przeciwbieżnym w obiektach techniki morskiej”, promotor: prof. dr hab. inż. Anatolij Afonin, recenzenci: prof. dr hab. inż. Grzegorz Kamiński, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, prof. dr inż. Ryszard Sikora, Wydział Elektryczny, Politechnika Szczecińska.
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych
  - 2001 – 2005 doktorant, Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej,
  - 2005 - 2007 asystent w Instytucie Elektrotechniki Politechniki Szczecińskiej, Zakład Urządzeń Elektrycznych i Elektrotechniki Morskiej,
  - 2007 - 2009 adiunkt w Instytucie Elektrotechniki Politechniki Szczecińskiej, Zakład Urządzeń Elektrycznych i Elektrotechniki Morskiej,
  - od 2009 adiunkt w Katedrze Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 ze zm.).



- A) tytuł osiągnięcia naukowego  
Budowa, właściwości i optymalizacja maszyny elektrycznej wzbudzonej magnesami trwałymi i układami dodatkowymi.
- B) osiągnięcie naukowe – cykl dziesięciu publikacji naukowych powiązanych tematycznie:
- I) artykuły w czasopismach zagranicznych recenzowanych:
1. P. Paplicki, "Influence of Magnet and Flux-Barrier Arrangement on Flux Control Characteristics of Hybrid Excited ECPMS-machine", *Elektronika ir Electrotechnika*, vol. 23, no. 2, 2017, pp. 15-20, <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eie.23.2.14461>  
Czasopismo indeksowane w WoS, IF (2015)= 0,389, lista MNiSW – 15 pkt.
  2. P. Paplicki, "Optimization of the electrically controlled permanent magnet excited synchronous machine to improve flux control range", *Elektronika ir Electrotechnika*, vol. 20, no. 10, 2014, pp. 17-22, <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.20.10.593>  
Czasopismo indeksowane w WoS, IF (2014)= 0,561, lista MNiSW – 15 pkt.
  3. Di Barba, M. Bonislowski, R. Pałka, P. Paplicki, M. Wardach, "Design of Hybrid Excited Synchronous Machine for Electrical Vehicles", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 8, August 2015, DOI: 10.1109/TMAG.2015.2424392,  
Czasopismo indeksowane w WoS, IF (2015)= 1,277, lista MNiSW – 25 pkt.
  4. P. Putek, P. Paplicki, R. Pałka, "Low cogging torque design of Permanent-Magnet machine using modified multi-level set method with total variation regularization", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, No. 2, Feb. 2014, DOI: 10.1109/TMAG.2013.2286297,  
Czasopismo indeksowane w WoS, IF (2014)= 1,386, lista MNiSW – 27 pkt.
- II) artykuły w czasopismach krajowych recenzowanych:
5. Pałka Ryszard, Paplicki Piotr, Wardach Marcin: "Oddziaływanie klinów magnetycznych na parametry maszyny elektrycznej z magnesami i regulacją strumienia", *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 90, nr 10, 2014, str. 11-15,  
Czasopismo indeksowane w Scopus, lista MNiSW – 10 pkt.
  6. P. Paplicki, "A novel rotor design for a hybrid excited synchronous machine", *Archives of Electrical Engineering*, vol. 66, no. 1, 2017, pp. 29-40, DOI 10.1515/ae-2017-0003,  
Czasopismo indeksowane w WoS, IF (2017)= 0,xxx, lista MNiSW – 15 pkt.
  7. P. Paplicki, M. Wardach, M. Bonislowski, and R. Pałka, "Simulation and experimental results of hybrid electric machine with a novel flux control strategy", *Archives of Electrical Engineering*, vol. 64, no. 1, pp. 37–51, 2015, DOI 10.1515/ae-2015-0005,  
Czasopismo indeksowane w WoS, IF (2016)= 0,xxx, lista MNiSW – 15 pkt.



8. P. Paplicki, "Modified concept of axial-flux permanent magnet machine with field weakening capability", *Archives of Electrical Engineering*. vol. 63, no. 2, pp. 177–185, 2014, DOI 10.2478/ae-2014-001,

Czasopismo indeksowane w Scopus, lista MNiSW – 10 pkt.

III) publikacje konferencyjne recenzowane:

9. P. Paplicki, "Simplified Reluctance Equivalent Circuit for Hybrid Excited ECPMS-Machine Modelling", *Proceedings of the 21<sup>th</sup> International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, 2016, pp. 241-244, DOI: 10.1109/MMAR.2016.7575140,

Publikacja konferencyjna indeksowana w WoS, lista MNiSW – 15 pkt.

10. P. Paplicki, R. Piotuch, "Improved Control System of PM Machine with Extended Field Control Capability for EV Drive", *Proceedings of the International Conference on Mechatronics - Ideas for Industrial Applications, Springer International Publishing*, vol. 317, 2015 pp. 125-132, DOI: 10.1007/978-3-319-10990-9\_12,

Publikacja konferencyjna indeksowana w WoS, lista MNiSW – 10 pkt.

- C) omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Obecnie obserwuje się ogromne zainteresowanie pojazdami samochodowymi z napędem elektrycznym. Prace koncepcyjne, badawcze oraz wdrożeniowe w obszarze wysokosprawnych napędów elektrycznych do samochodów osobowych, dostawczych i autobusów są prowadzone w wielu ośrodkach naukowych oraz biurach badawczo-rozwojowych, liczących się koncernów motoryzacyjnych na świecie.

W układzie napędowym, jednostkę napędową stanowi najczęściej bezszczotkowy silnik z magnesami trwałymi (BSMT), o różnorodnych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Stosuje się również silniki indukcyjne klatkowe oraz reluktancyjne. Niezależnie jednak od typu silnika ich konstrukcja, rodzaj wzbudzenia pola, sposób chłodzenia itd. muszą uwzględniać kryteria minimalnych kosztów i gabarytów oraz postulowanych parametrów i trudne warunki eksploatacji. Cały układ napędowy ma pracować niezawodnie i efektywnie.

Popularność BSMT w układach napędowych pojazdów elektrycznych wynika, przede wszystkim z ich dobrych właściwości regulacyjnych. Dodatkowo, w porównaniu z maszynami indukcyjnymi, czy maszynami komutatorowymi prądu stałego, wyróżniają się m.in. wyższą sprawnością i lepszym stosunkiem mocy do masy. Oprócz oczywistych zalet, posiadają jednak zasadniczą wadę: brak możliwości regulacji pola wzbudzenia od magnesów trwałych (MT). Tu należy dodać, że problem ten jest szczególnie istotny dla silnika pracującego w bardzo szerokim zakresie regulacji prędkości obrotowej. Duża prędkość obrotowa silnika, powyżej tzw. prędkości bazowej, może być osiągnięta jedynie w wyniku osłabienia pola wzbudzenia maszyny. Zakres zmian strumienia maszyny,

w takich napędach, odbywa się często w stosunku 3:1, a nawet 4:1. Efektem tego działania jest możliwość przesunięcia punktu pracy BSMT z charakterystyki stałego momentu w obszar pracy przy stałej mocy silnika, w szerokim zakresie.

We współczesnych napędach elektrycznych osłabianie strumienia BSMT odbywa się poprzez oddziaływanie składową prądu stojana (związaną z osią podłużną wirnika) ze sterowaniem połowo zorientowanym. Metoda skuteczna, lecz wymagająca użycia wielofunkcyjnych układów przekształtnikowych do sterowania pracą silnika i kontrolowania przepływu mocy w układzie napędowym. Wielość funkcji jakie muszą realizować sprawia, że są to układy rozbudowane, generujące dodatkowe starty mocy, które niekorzystnie wpływają na sprawność całego układu napędowego.

Jako rozwiązanie alternatywne do napędu elektrycznego z silnikiem z MT i metodą jego sterowania, w zakresie pracy przy osłabionym polu wzbudzenia, proponuje się napęd z silnikiem o hybrydowym wzbudzeniu (HW). Istota zmiany strumienia maszyny WH polega głównie na oddziaływaniu na strumień od MT stałym polem magnetycznym, w układzie szeregowym lub równoległym. Pole to wzbudzone jest w dodatkowym obwodzie elektrycznym, sterowanym prądowo. Uzwojenia lub cewka dodatkowego wzbudzenia mogą być rozmieszczone, zarówno w stojanie jak i na wirniku.

Należy dodać, że w ostatniej dekadzie obserwuje się duży postęp w rozwoju maszyn WH. W wielu ośrodkach na świecie, intensywnie rozwija się wysokosprawne silników WH o oczekiwanych właściwościach regulacyjnych, które mogą przynieść poprawę efektywności pracy napędów elektrycznych, również stosowanych w pojazdach elektrycznych.

Celem naukowym wymienionych prac było rozwinięcie koncepcji budowy i podanie skutecznych metod zasilania, sterowania i optymalizacji nowego typu maszyn elektrycznych wzbudzanych hybrydowo tj. magnesami trwałymi i elektromagnetycznie poprzez dodatkowe uzwojenie wzbudzenia, zasilane prądem stałym  $I_{DC}$ .

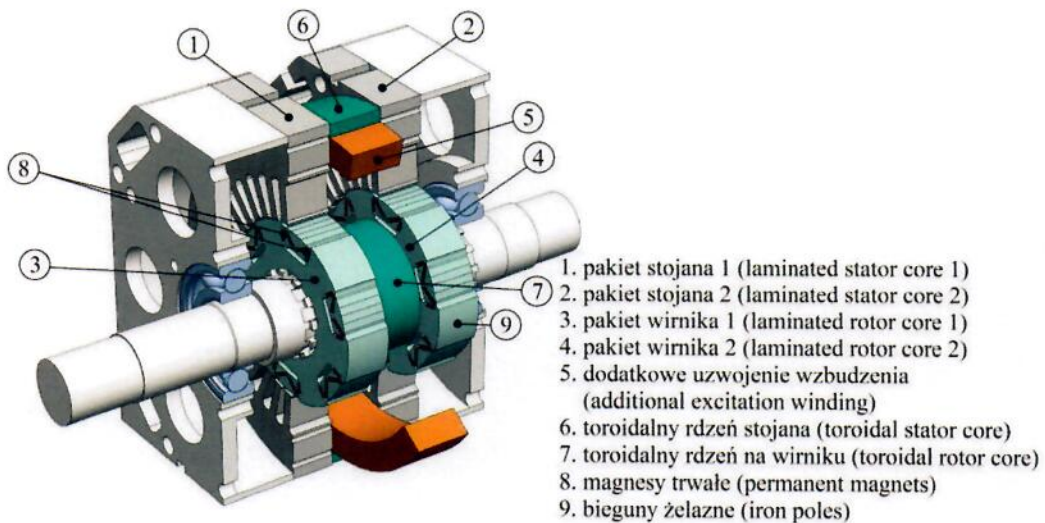
Przedstawiony dorobek naukowy jest podsumowaniem wieloletnich prac koncepcyjnych, analitycznych, konstrukcyjnych oraz doświadczalnych i może wskazywać nowy kierunek w rozwoju wysokosprawnych maszyn elektrycznych WH o doskonałych właściwościach regulacyjnych.

Załączone prace zawierają:

1. Koncepcje budowy nowych maszyn WH o strukturach cylindrycznej i tarczowej,
2. Dwuwymiarowe (2D) i trójwymiarowe (3D) modele połowe maszyn WH,
3. Metody optymalizacji maszyn WH,
4. Sposoby zasilania i sterowania maszyn WH,
5. Wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na maszynach prototypowych.

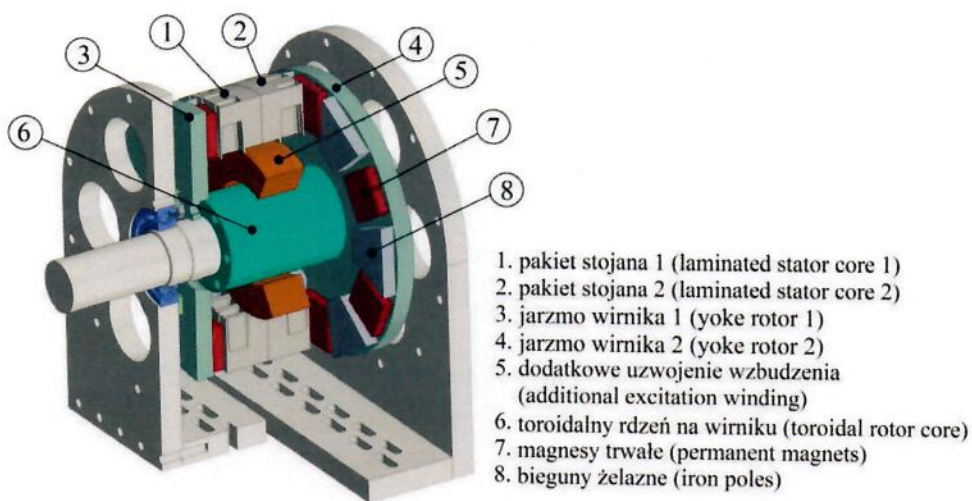
W publikacjach [1-6] i [8-10] zawarto opracowania maszyny WH o strukturze cylindrycznej, oznaczonej w publikacjach skrótem ECPMSM (z ang. Electric Controlled Permanent Magnet Excited Synchronous Machine). Efektem prac [1,6] jest

przedstawiona na rys. 1 koncepcja maszyny ECPMSM będącej przedmiotem wynalazku, na który udzielono patentu. W rozwiązaniu tym zastosowano nowatorską koncepcję barierowania strumienia magnetycznego. Obwód magnetyczny stojana tworzą dwa pakietowane rdzenie stojana (1) i (2) rozdzielone dodatkowym uzwojeniem wzbudzenia (5), umieszczonym wewnątrz toroidalnego rdzenia stojana (6). Obwód magnetyczny wirnika tworzą dwa pakiety wirnika (3) i (4) z MT (8), rozdzielone toroidalnym rdzeniem na wirniku (7). Charakterystyczne dla konstrukcji wirnika jest to, że bieguny z MT (8) jednej części wirnika (3) są polaryzowane przeciwnie do biegunów z MT drugiej części wirnika (4). Między biegunami z MT występują bieguny żelazne (9).



Rys. 1. Maszyna ECPMSM z wirnikiem V1.

W publikacji [8] zawarto opracowanie maszyny WH o strukturze tarczowej, oznaczonej w publikacji skrótem FCAFPM (z ang. Field Controlled Axial Flux Permanent Magnet Machine), której widok pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Maszyna FCAFPM.

Obwód magnetyczny stojana tworzą dwa (alternatywnie jeden wspólny) toroidalne rdzenie stojana (1) i (2), wewnątrz których, w centralnej części, ułożone jest dodatkowe uzwojenie wzbudzenia (5). Obwód magnetyczny wirnika tworzą dwie tarcze (jarzma) wirnika (3) i (4) z MT (8), połączone toroidalnym rdzeniem na wirniku (6). Charakterystyczne dla konstrukcji wirnika jest to, że bieguny z MT (8) jednej części wirnika (3) są polaryzowane zgodnie z biegunów z MT drugiej części wirnika (4). Między biegunami z MT występują bieguny żelazne (8).

Ze względu na przestrzenny i niesymetryczny rozkład pola magnetycznego maszyn WH, analizę sprzężonych zjawisk elektromagnetycznych i mechanicznych wykonano głównie na podstawie wyników badań polowych. W tym celu autor, wykorzystując metodę elementów skończonych (MES), opracował dokładne trójwymiarowe modele polowe (3D-MES) maszyn WH o strukturach cylindrycznej i tarczowej, w kilku wariantach konstrukcyjnych. Przygotowane narzędzie obliczeniowe pozwoliło m.in. wyznaczyć i analizować charakterystyki elektromagnetyczne oraz oszacować teoretyczne osiągi nowych koncepcji maszyn. Ponadto, w połączeniu z procedurami optymalizacyjnymi, stworzyło skuteczną hybrydową metodę optymalizacyjną. Pozwoliło to na znaczące przyspieszenie procesu projektowania oraz optymalizacji maszyn. Często też stanowiło jedyny, skuteczny i szybki sposób weryfikacji nowej koncepcji konstrukcyjnej maszyny WH, bez tworzenia kolejnych modeli symulacyjnych lub prototypów.

Jedno z ważniejszych zadań naukowych polegało na wypracowaniu podstaw teoretycznych budowy struktury wirnika dla maszyny ECPMSM, uwzględniających wymagania w zakresie regulacji pola wzbudzenia maszyny.

Za miarę regulacji wzbudzenia strumienia magnetycznego maszyny ECPMSM oraz maszyny FCAFPM przyjęto stosunek strumienia głównego maszyny zwiększanego polem wywołanym prądem  $I_{DC+}$  do strumienia głównego maszyny osłabianego prądem  $I_{DC-}$ . Dla większości badanych maszyn WH zakres prądowy  $\pm 10A$ , regulujący pole wzbudzenia, wytwarzał, wyrażaną w amperozwojach (AT z ang. Ampere-turns), siłę magnetomotoryczną (SMM) dodatkowego uzwojenia wzbudzenia o wartości  $\pm 7500 AT$ . To gwarantowało przeprowadzenie kompleksowych badań symulacyjnych i eksperymentalnych, również w stanie głębokiego nasycenia obwodu magnetycznego maszyn WH. Dodatkowo, w badaniach symulacyjnych analizowano zmiany momentu obrotowego maszyny, wyznaczanego przy różnych położeniach wirnika i przy różnym obciążeniu prądowym uzwojeń stojana oraz dodatkowego uzwojenia wzbudzenia. To pozwoliło wyznaczyć spodziewany wpływ pola od dodatkowego uzwojenia na charakterystykę, harmoniczne oraz poziom tętnień momentu elektromagnetycznego maszyn WH.

W pracach [1,2,3,6,7], oprócz badań teoretycznych, przedstawiono również wyniki z badań doświadczalnych wykonanych na kilku prototypach maszyn ECPMSM z wirnikiem z magnesami powierzchniowymi lub magnesami zagnieżdżanymi w wirniku. Głównym

celem tych badań była weryfikacja eksperymentalna skuteczności regulacji wzbudzenia nowych struktur maszyn, efektywności ich pracy oraz starowania. Wyniki tych doświadczeń potwierdziły właściwy kierunek badawczy, związany z poszukiwaniem optymalnych struktur dla wirnika maszyny ECPMSM.

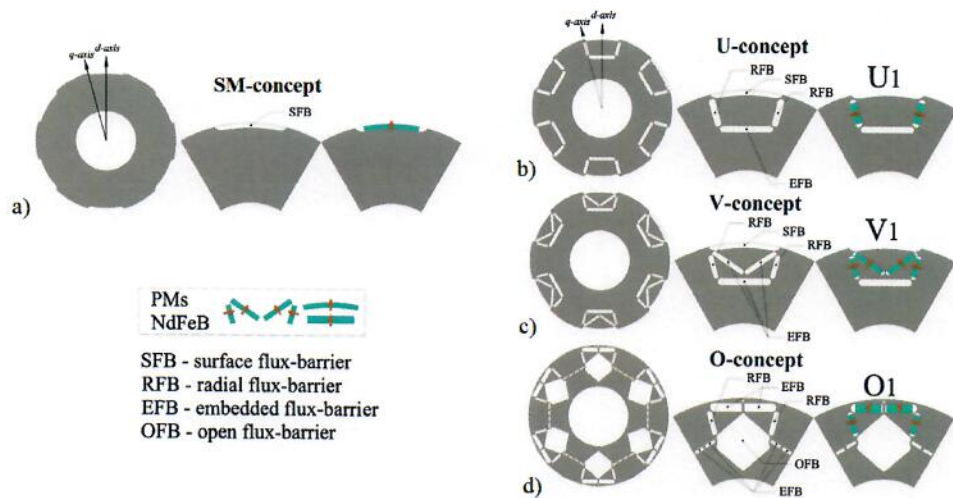
Uzyskane wyniki symulacyjne i eksperymentalne wykazały również negatywny wpływ pola od dodatkowego obwodu wzbudzenia. Podczas dowzbudzania maszyny ECPMSM zwiększa się momentu zaczepowy (MZ), w konsekwencji pulsacja momentu i hałas. To wskazało kolejny kierunek badań naukowych nad opracowaniem skutecznych metod optymalizacji geometrii wirnika i części stojana maszyny ECPMSM, w celu minimalizacji MZ. W pracy [4] zaproponowano algorytm optymalizacyjny łączący metody MES i metody zbiorów poziomicowych z regularyzacją wahania funkcji (w innych pracach również z topologiczną analizą wrażliwościową). Otrzymane rezultaty optymalizacji geometrii MT i bieguna żelaznego wirnika oraz zębów stojana maszyny ECPMSM potwierdziły skuteczność zaproponowanych metod. W pracy [5] zaproponowano i przebadano również koncepcję klinów magnetycznych w żłobkach stojana, w celu redukcji MZ maszyny ECPMSM.

ad. [1] P. Paplicki, "Influence of Magnet and Flux-Barrier Arrangement on Flux Control Characteristics of Hybrid Excited ECPMS-machine", *Elektronika ir Electrotechnika*, vol. 23, no. 2, 2017, pp. 15-20.

Autor wniosku przedstawił koncepcje nowych struktur wirnika dla maszyny ECPMSM z barierami magnetycznymi (BM) dla strumienia od MT oraz dla strumienia wzbudzanego dodatkowym uzwojeniem. Zaproponował trzy unikatowe struktury wirnika (rys. 3b-3c) o różnych ułożeniach, liczbie i geometrii BM oraz MT. Dla bieguna z MT opracował: w koncepcji U cztery BM (rys. 3b) w koncepcji V sześć BM (rys. 3c) oraz w koncepcji O dziewięć barier magnetycznych (rys. 3d).

Na podstawie sporządzonych modeli 3D MES wyznaczył charakterystyki regulacyjne strumienia wzbudzenia, przebiegi napięć indukowanych w uzwojeniu twornika, kątową zmienność momentu elektromagnetycznego i indukcyjności maszyny ECPMSM z wirnikiem w dziewięciu wariantach konstrukcyjnych. Przedstawił wpływ rozmieszczenia MT i BM w wirniku na rozkład pola magnetycznego i zakres zmian strumienia wzbudzenia maszyny ECPMSM. Wykazał, że duża skuteczność barierowania strumienia wzbudzanego dodatkowym uzwojeniem w obszarze bieguna z MT, może być osiągnięta w maszynie ECPMSM z wirnikiem o strukturze U1 (także U2 z trzecim magnesem na biegunie z MT) oraz z wirnikiem o strukturze V1.





Rys. 3. Struktury wirnika dla maszyny ECPMSM.

Dokonując analizy porównawczej charakterystyk magnetycznych i regulacyjnych badanych modeli silnika ECPMSM, wskazał strukturę wirnika V1 (rys. 3c), którą poddano weryfikacji metodą eksperymentu. Zbudowano wirnik dla prototypowej maszyny ECPMSM o mocy 20 kW, którą oznaczono w publikacji skrótem ECPMSM V1. Wyniki eksperymentalne potwierdziły skuteczność barierowania strumienia, w szczelinie maszyny w obszarze bieguna z MT. Pomiar napięć indukowanych w uzwojeniach stojana, pomierzonych na zaciskach maszyny, jednoznacznie potwierdziły, że przewidywana regulacja strumienia wzbudzenia maszyny w zakresie 10:1 (przy  $\pm 6000$  AT) została osiągnięta.

ad. [2] P. Paplicki, "Optimization of the electrically controlled permanent magnet excited synchronous machine to improve flux control range", *Electronika ir Electrotechnika*, vol. 20, no. 10, 2014, pp. 17-22.

Autor zaproponował metodę optymalizacji maszyny ECPMSM dla poprawy jej właściwości regulacyjnych. Zaproponował wykorzystanie hybrydowej metody optymalizacyjnej łączącej algorytm genetyczny (AG), realizujący zadanie optymalizacyjne, oraz metodę numeryczną (w tym wypadku MES). Opracował model połowy 3D-MES maszyny ECPMSM o mocy 1 kW z magnesami mocowanymi na powierzchni wirnika (jak na rys. 3a). Przeprowadził analizę zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w maszynie i wskazał obszary szczególnie aktywne magnetycznie, w procesie regulacji strumienia wzbudzenia maszyny prądem  $I_{DC}$ . Wykazał wpływ rozmieszczenia i geometrii MT na rozkład pola magnetycznego maszyny. Opisał charakterystykę zmiany strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej w obszarach bieguna żelaznego ( $\Phi_{IP}$ ) i bieguna z MT ( $\Phi_{MT}$ ), w funkcji prądu  $I_{DC}$ . W celu osiągnięcia efektu regulacji strumienia



wzbudzenia, w oczekiwanym zakresie, wskazał konieczność różnicowania reluktancji szczeliny powietrznej w obszarze bieguna z MT, w stosunku do reluktancji szczeliny powietrznej powstałej w obszarze bieguna żelaznego.

Na podstawie przeprowadzonych analiz, opracowanych modeli oraz powszechnie stosowanych metod optymalizacyjnych autor zaproponował wielokryterialną optymalizację geometrii biegunów wirnika maszyny ECPMSM, w której zawarto dwie funkcje celu. Opisał zagadnienie optymalizacji, podał kryterium optymalności, przestrzenie przeszukiwać, ograniczenia, algorytmy oraz określił powierzchnie całkowania wektora indukcji magnetycznej do wyznaczenia strumieni  $\Phi_{IP}$  i  $\Phi_{MT}$ .

Przedstawił nową geometrię biegunów wirnika maszyny ECPMSM którą poddano dodatkowym badaniom symulacyjnym. Na podstawie otrzymanych rezultatów wykazał, że optymalizowany wirnik umożliwi zmianę strumienia wzbudzenia maszyny prądem  $I_{DC}$  w zakresie, nie mniej niż 3:1.

Należy dodać, że w pracy przedstawiono również wybrane wyniki symulacyjne otrzymane na modelu 3D-MES, które porównano z wynikami doświadczalnymi. W przypadku charakterystyki napięcia indukowanego w uzwojeniach twornika, w funkcji prądu  $I_{DC}$ , uzyskano dużą zbieżność rezultatów symulacji i pomiarów, co pośrednio potwierdziło adekwatność opracowanych modeli polowych.

Warto również odnotować, że maszyna ECPMSM o mocy 1 kW, będąca przedmiotem optymalizacji, została wcześniej wykonana w ramach pierwszych prac badawczych. Charakterystyczne dla prototypu maszyny było to, że znaczna część magnetowodu wirnika i toroidalnego rdzenia stojana była wykonana z proszków magnetycznych miękkich, w modyfikowanej technologii SMC (soft magnetic composite), które zaprasowane utwardzono żywicą epoksydową. W modelu maszyny uwzględniono, wyznaczoną doświadczalnie, charakterystykę magnetyczną wytworzonego, w tak nietypowej technologii materiału.

Przedstawiony sposób optymalizacji geometrii wirnika i jej efekty stały się przyczynkiem do dalszych prac koncepcyjnych, konstrukcyjnych i optymalizacyjnych maszyny ECPMSM o znacznie większej mocy.

ad. [3] Di Barba, M. Bonislawski, R. Pałka, P. Paplicki, M. Wardach, "Design of Hybrid Excited Synchronous Machine for Electrical Vehicles", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 8, August 2015.

Autor zaproponował zastosowanie dwuetapowej metody optymalizacji wielokryterialnej maszyny ECPMSM o mocy 20 kW z magnesami mocowanymi powierzchniowo na wirniku, jak na rys. 2a. Na potrzeby badania otoczenia rozwiązań Pareto-optymalnych zaproponowano metodę, będącą połączeniem stochastycznego (AG), a w drugim wariantcie deterministycznego (SSO- zastępczej funkcji), algorytmu optymalizacyjnego do optymalizacji wielokryterialnej oraz metody 3D MES. Celem było opracowanie metody wyboru najlepszego rozwiązania (o najmniejszej wrażliwości na



wahania wartości zmiennych decyzyjnych) ze zbioru rozwiązań Pareto- optymalnych, otrzymywanych w konsekwencji zastosowania metody optymalizacji wielokryterialnej. Zdefiniowano 4 kryteria optymalizacji (minimalizacja masy  $f_1(x)$  i nasycenia  $f_3(x)$  oraz maksymalizacja momentu  $f_2(x)$  i strumienia  $f_4(x)$ ) oraz 6 zmiennych decyzyjnych.

W pierwszym etapie optymalizacji minimalizowano zewnętrzny wymiar toroidalnego rdzenia stojana maszyny. Zaproponował analizę wrażliwość funkcji  $f_3(x)$  na zmiany wartości pięciu zmiennych decyzyjnych, jako dodatkowe kryterium optymalizacyjne.

Autor przeprowadził procedurę optymalizacji szerokości toroidalnego rdzenia stojana podając 2 rozwiązania kompromisowe, wyznaczone algorytmami AG oraz SSO.

W drugim etapie optymalizacji maksymalizowano strumień bieguna żelaznego  $\Phi_{IP}$  dla uzyskania szerszego zakresu regulacji pola wzbudzenia maszyny ECPMSM.

ad. [4] P. Putek, P. Paplicki, R. Pałka, "Low cogging torque design of Permanent-Magnet machine using modified multi-level set method with total variation regularization", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, No. 2, Feb. 2014.

Analiza zawartości wyższych harmonicznycch w rozkładzie indukcji magnetycznej w szczelinie roboczej, przeprowadzona podczas wzmocnienia pola wzbudzenia maszyny ECPMSM, wykazała negatywny efekt przyrostu strumienia w szczelinie, w obszarze bieguna żelaznego. Niestety, duży udział wyższych harmonicznycch pola magnetycznego w szczelinie powoduje istotny, nawet kilkakrotny wzrost m.in. momentu zaczepowego. Autor pracy zdefiniował cel optymalizacji biegunów wirnika i zębów stojana maszyny ECPMSM w celu minimalizacji MZ. Znając charakterystykę zmian strumieni magnetycznych w szczelinie powietrznej w obszarach bieguna żelaznego  $-\Phi_{IP}$  i bieguna z MT  $-\Phi_{MT}$ , w funkcji prądu  $I_{DC}$ , zaproponował włączenie uproszczonych modeli 2D-MES maszyny ECPMSM do algorytmu optymalizacyjnego zawierającego metodę zbiorów poziomicowych, opracowanego przez współautorów pracy. Zbudował modele polowe i przeprowadził końcowe symulacje weryfikacyjne na modelach 3D-MES. Przedstawione wyniki potwierdziły skuteczność proponowanej metody optymalizacyjnej gdzie niemal całkowicie zredukowano MZ i obniżono wartości wyższych harmonicznycch w sile elektromotorycznej (SEM) rotacji.

ad. [5] Pałka Ryszard, Paplicki Piotr, Wardach Marcin: "Oddziaływanie klinów magnetycznych na parametry maszyny elektrycznej z magnesami i regulacją strumienia", *Przełąd Elektrotechniczny*, R. 90, nr 10, str. 11-15, (2014),

Autor zaproponował i wykonał badania symulacyjne na modelach 3D-MES, w celu wyznaczenia wpływu klinów magnetycznych, zamykających żłobki stojana, na moment elektromagnetyczny maszyny ECPMSM z MT mocowanymi powierzchniowo na wirniku. Dla względnych przenikalności magnetycznych klinów  $\mu_{rk}$  w zakresie 1-16 wyznaczył zmiany momentu elektromagnetycznego, pulsację momentu, SEM indukowaną

w uzwojeniach stojana oraz przeprowadził analizę harmoniczną SEM przy osłabianiu, bez udziału dodatkowego pola wzbudzenia oraz przy wzmacnianiu pola dodatkowym uzwojeniem wzbudzenia. Przedstawił rezultaty, które potwierdziły spodziewany, pozytywny wpływ użycia klinów magnetycznych w stojanie. Wykazał, że zastosowanie klinów o względnej przenikalności magnetycznych w zakresie  $\mu_{rk}=5\div 10$  powoduje skuteczną redukcję momentu zaczepowego o 50% oraz obniżenie wartości wyższych harmonicznych w SEM rotacji i pulsacji momentu elektromagnetycznego o ok. 10%. Co ważne, poprawiając właściwości ruchowe maszyny ECPMSM, utrzymano średnią wartość momentu obrotowego, jaką otrzymano w silniku bez klinów magnetycznych.

ad. [6] P. Paplicki, "A novel rotor design for a hybrid excited synchronous machine", *Archives of Electrical Engineering*, vol. 66, no. 1, 2017, pp. 29-40.

Autor przedstawił nowe koncepcje struktury wirnika dla maszyny ECPMSM o doskonałych właściwościach regulacyjnych. Szczegółowo opisał i graficznie zilustrował przebieg procesu wzmacniania i osłabiania strumienia głównego maszyny ECPMSM z wirnikiem z magnesami mocowanymi powierzchniowo (rys. 3a). Stosując model liniowy, podał zestaw równań dla strumieni magnetycznych maszyny ECPMSM, w których uwzględniono składowe strumienia w szczelinie oraz strumienie rozproszenia maszyny. Na podstawie opracowanych modeli 3D-MES wyznaczył charakterystyki regulacyjne strumienia wzbudzenia, przebiegi SEM rotacji indukowaną w uzwojeniu twornika, kątową zmienność momentu elektromagnetycznego i indukcyjności maszyny ECPMSM z wirnikiem w czterech wariantach konstrukcyjnych. Wykazał, że w największym zakresie regulację strumienia wzbudzenia dodatkowym uzwojeniem w obszarze bieguna z MT można osiągnąć w maszynie ECPMSM z wirnikiem o strukturze M2. W tym przypadku biegun z MT uformowany był, niemal w całości z MT, w postaci ćwierćwałka. Ze względu na trudności technologiczne nie zdecydowano się jednak na budowę wirnika o takiej strukturze. Podano wyniki badań eksperymentalnych w zakresie osłabiania pola maszyny ECPMSM z wirnikiem o strukturze V1, gdzie uzyskano zakres osłabiania pola wzbudzenia w stosunku 4:1 (przy 0-6000 AT).

ad. [7] P. Paplicki, "Modified concept of axial-flux permanent magnet machine with field weakening capability", *Archives of Electrical Engineering*. vol. 63, no. 2, 2014, pp. 177-185.

Autor przedstawił koncepcje maszyny FCAFPM z zewnętrznym wirnikiem dwutarczowym z MT mocowanymi powierzchniowo, z możliwością regulacji strumienia wzbudzenia. Opisał i graficznie zilustrował przebieg procesu wzmacniania i osłabiania strumienia głównego maszyny, stałym polem magnetycznym wzbudzonym w cewce dodatkowej. Opisał zasadę działania, budowę magnetowodu oraz charakterystyki magnetyczne maszyny. Opracował model numeryczny 3D-MES 3-fazowej, 12-

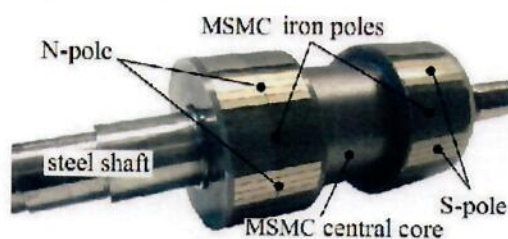
biegunowej maszyny FCAFPM i wyznaczył charakterystyki regulacyjne strumienia wzbudzenia, przebiegi SEM rotacji indukowanej w uzwojeniu twornika oraz charakterystyki momentu elektromagnetycznego maszyny. Przedstawił efekty regulacji strumienia wzbudzenia maszyny FCAFPM, uzyskanej w zakresie 4:1, m.in. dzięki odpowiedniemu zróżnicowaniu reluktancji szczeliny powietrznej w obszarze bieguna z MT i reluktancji szczeliny powietrznej powstałej w obszarze bieguna żelaznego.

ad. [8] P. Paplicki, M. Wardach, M. Bonisławski, and R. Pałka, "Simulation and experimental results of hybrid electric machine with a novel flux control strategy", *Archives of Electrical Engineering*, vol. 64, no. 1, pp. 37–51, 2015.

W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych maszyny ECPMSM mocy 20kW, z magnesami mocowanymi na powierzchni wirnika. Podano równania napięć i strumieni magnetycznych, strukturę układu sterowania oraz kierunki dalszych prac w zakresie ulepszonej strategii sterowania maszyny ECPMSM.

Bazując na wynikach przedstawionych w pracy [2] oraz częściowo w [3] autor przeprowadził serię obliczeń polowych na potrzeby projektu maszyny ECPMSM. Główny cel tych badań polegał na określeniu geometrii i sposobu ułożenia magnesów oraz szerokości szczeliny powietrznej od strony MT. W tym przypadku zastosowano magnesy NdFeB serii N38SH o parametrach  $B_r = 1,22$  T;  $H_{cb(min)} = 911$  kA/m;  $T_{max} = 150^\circ\text{C}$ .

Na podstawie otrzymanych wyników autor sporządził rekomendację i projekt konstrukcyjny do wykonania wirnika. Należy dodać, że autor brał również czynny udział w pracach konstrukcyjnych maszyny ECPMSM, a w szczególności przy budowie wirnika, którego widok przedstawiono na rys. 4.



Rys.4. Wirnik z MT mocowanymi na powierzchni dla maszyny ECPMSM.

Badania eksperymentalne wykazały również, że wpływ na efektywność regulacji pola wzbudzenia ma materiał z którego wykonany jest wał maszyny. Autor stwierdził, że w maszynie ECPMSM należy dążyć do ograniczenia strumienia rozproszenia powstałego w obszarze ferromagnetycznego wału. Problem ten analizowany był również w pracy [6] a ograniczenie strumienia rozproszenia jest proponowane w wynalazku, na który udzielono patentu krajowego. Zdaniem autora, wnioski z tych badań należy brać pod uwagę na etapie projektowania, analizowania rozkładu pola magnetycznego oraz badań eksperymentalnych maszyny ECPMSM lub innych maszyn WH o budowie zbliżonej.

ad. [9] P. Paplicki, "Simplified Reluctance Equivalent Circuit for Hybrid Excited ECPMS-Machine Modelling", *Proceedings of the 21<sup>th</sup> International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, 2016, pp. 241-244.

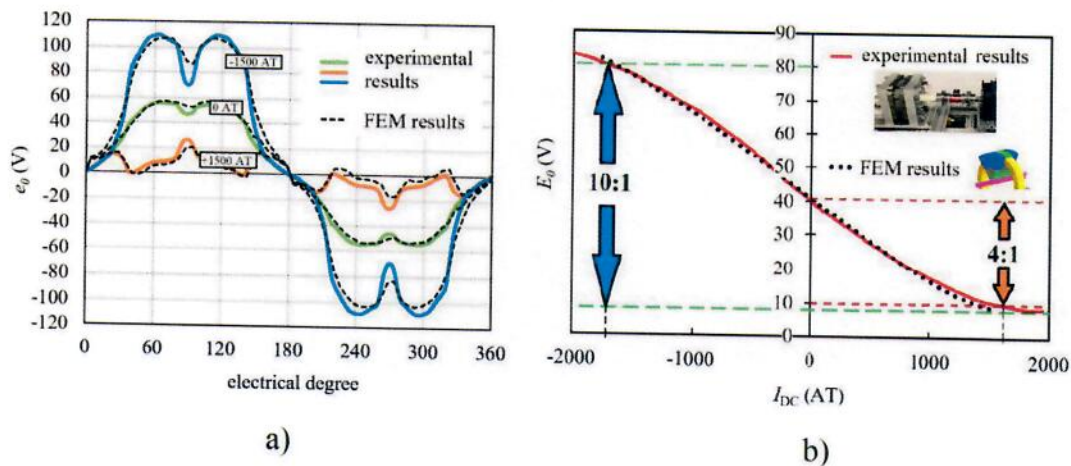
Autor dokonał szczegółowej analizy rozkładu pola magnetycznego w modelu maszyny ECPMSM z wirnikiem w koncepcji V1 (rys. 3c), z magnesami zagnieżdżanymi. Wykazał możliwość kształtowania rozkładu pola w szczelinach roboczych maszyny poprzez wprowadzenie dodatkowej szczeliny lub szczelin powietrznych pomiędzy pakiety wirnika i toroidalny rdzeń wirnika. Należy dodać, że jako rozwiązanie alternatywne, autor proponuje wprowadzenie dodatkowej szczeliny pomiędzy pakiety stojana. Odnotowano, że dodatkowa reluktancja w obwodzie magnetycznym powoduje przekierowanie części strumienia od MT w obszar bieguna żelaznego, zwiększając gęstość mocy maszyny o kilkanaście procent. Proces ten szczegółowo wyjaśniono w publikacji [6]. Odbywa się to jednak kosztem zmniejszenia efektywności regulacji wzbudzenia dodatkowym uzwojeniem. Autor wyznaczył charakterystyki strumienia skojarzonego z uzwojeniem stojana w funkcji szerokości szczeliny dodatkowej, przy różnym obciążeniu prądowym dodatkowego uzwojenia wzbudzenia. Dodatkowo wprowadzoną reluktancję uwzględnił podczas opracowania uproszczonego schematu zastępczego obwodu magnetycznego maszyny. Należy zauważyć, że w podanym schemacie uwzględniono również obwody rozproszenia strumienia od MT oraz dodatkowego uzwojenia wzbudzenia. Kontynuacja tych prac pozwoli na opracowanie szybkich obwodowych metod analitycznych i optymalizacyjnych maszyny ECPMSM z wirnikiem w koncepcji V1 i jej modyfikacjach.

ad. [10] P. Paplicki, R. Piotuch, "Improved Control System of PM Machine with Extended Field Control Capability for EV Drive", *Proceedings of the International Conference on Mechatronics - Ideas for Industrial Applications*, Springer International Publishing, vol. 317, 2015, pp. 125-132.

Autor w pracy zaproponował koncepcję prototypowania i optymalizacji układu napędowego ze sterowaniem polowo zorientowanym maszyny ECPMSM. Przedstawił algorytm optymalizacji układu, który zawiera blok danych wejściowych, otrzymanych w wyniku symulacji lub pomiarów oraz blok obliczeniowy. Zbiór danych wejściowych tworzyły m.in. parametry elektromechaniczne i elektromagnetyczne silnika oraz charakterystyka strumienia wzbudzenia w funkcji prądu  $I_{DC}$ . Dane wejściowe do bloku analitycznego otrzymano w wyniku analizy polowej silnika ECPMSM. Blok obliczeniowy zawierał model matematyczny, na podstawie którego wyznaczono mapy sprawności silnika dla różnych wartości prądu  $I_{DC}$ . To pozwoliło wyznaczyć charakterystyki prądu  $I_{DC}$  w funkcji mocy i prędkości obrotowej silnika, na potrzeby rozwoju nowatorskich koncepcji sterowania maszyną ECPMSM na największą sprawność. Według założeń,

wielkościami sterującymi momentem obrotowym silnika jest składowa  $i_q$  wektora prądu stojana oraz prąd  $I_{DC}$ . Składowa  $i_d$  wektora prądu stojana wraz z prądem  $I_{DC}$  określa wartość i dynamikę zmian strumienia wirnika. Dzięki temu moment i strumień w silniku mogą być sterowane niezależnie. Dodatkowo dzięki wzbudzeniu w układzie hybrydowym może to przynieść poprawę jakości, osiąągów i efektywności pracy napędu elektrycznego.

Zdaniem autora, uzyskane wyniki naukowe pozwoliły wyznaczyć nowe kierunki badawcze nad rozwojem maszyn WH i podały, stosując pewne uproszczenia, sposoby na ich skuteczne modelowanie i optymalizowanie. Udało się opracować struktury wirnika, przy których możliwe jest osiągnięcie regulacji pola wzbudzenia maszyny w stosunku przynajmniej 10:1. Efekt ten jest osiągnięty przy SMM dodatkowego uzwojenia wzbudzenia poniżej 1800 AT. Można śmiało stwierdzić, że otrzymany zakres regulacji pola wzbudzenia jest wystarczający, i zapewnia skuteczne osłabienia pola wzbudzenia maszyny oraz zwiększenie maksymalnej prędkości obrotowej silnika, w zakresie pracy przy stałej mocy. Osiągnięto to na ostatnim wykonanym prototypie maszyny ECPMSM z wirnikiem V1 (rys.1). Opracowana struktura wirnika, zawierająca bariery magnetyczne oraz niemagnetyczny wał, umożliwiła osłabienie pola magnetycznego maszyny ECPMSM oraz napięcia indukowanego w zakresie 4:1 (rys. 5) a w konsekwencji wielokrotne zwiększenie prędkości obrotowej wirnika.



Rys. 5. Kształt napięcia indukowanego w uzwojeniach twornika (a) oraz charakterystyka napięcia wyjściowego (b) w zależności od SMM dodatkowego uzwojenia wzbudzenia maszyny ECPMSM V1 pracującej jako generator na biegu jałowym, zarejestrowane podczas badań eksperymentalnych i symulacji.

Struktury wirników, w których zastosowano nowatorskie koncepcje barierowania strumienia magnetycznego przedstawione w pracach [1,6], łącznie z maszyną ECPMSM, stanowią przedmiot czterech wynalazków, na które udzielono patentu krajowego.

Rezultaty tych badań mogą stanowić impuls do dalszych prac naukowych ukierunkowanych na poszukiwanie wysokosprawnych maszyn WH. Należy tu dodać, że w zakresie rozwijania maszyn WH autor już poświęcił wiele uwagi nowatorskiej koncepcji aktywnego mostowania strumienia wzbudzenia zasilanego bezkontaktowo. Efektem tych prac są liczne, niepublikowane jak dotąd, opracowania nowych wirników dla maszyny ECPMSM z dodatkowymi cewkami wzbudzającymi, w wirniku lub z cewkami na osiowych mostach magnetycznych. Wybrane wyniki tych prac prezentowane będą na międzynarodowych konferencjach naukowych w 2017 roku.

#### 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze autora wniosku koncentrują się wokół modelowania, analizy i optymalizacji maszyn z MT różnych konstrukcji. Dużo uwagi poświęcono silnikom synchronicznym z MT do zastosowania w napędzie samochodowym. Analizowano struktury wirników takich maszyn pod kątem możliwości zwiększenia gęstości mocy, ograniczania tętnień momentu, obniżania strat oraz kształtowania obwodu magnetycznego o odpowiednim rozkładzie pola magnetycznego i indukcyjnościach.

Wiele uwagi autor poświęcił również maszynie tarczowej z MT i bezrdzeniowym stojanem uzwojonym w modyfikowanej technologii SEMA. Opracował szereg modeli polowych 3D-MES do analizy i optymalizacji geometrii silnika tarczowego np. jarzma wirnika, łącząc metody 3D MES i algorytmy genetyczne. W kilku publikacjach przedstawił wyniki prac symulacyjnych oraz eksperymentalnych prototypów maszyn tarczowych o mocy od 500W do 2kW.

Zakres zainteresowań naukowych autora obejmował również nietypowe silniki magnetoelektryczne. Autor prowadził badania symulacyjne niekonwencjonalnych maszyn elektrycznych z MT, do zastosowania w napędach pojazdów wodnych. W tym obszarze opracował koncepcje budowy dwuwirnikowych silników z MT, w tym o ruchu przeciwbieżnym, o strukturach cylindrycznej i tarczowej.

Równolegle, autor prowadził drugi kierunek naukowo-badawczy związany z analizą uwarunkowań techniczno-prawnych i ekonomicznych współczesnych sieci i instalacji elektrycznych niskiego napięcia. Ten obszar zainteresowań, łącznie z maszynami elektrycznymi, jest zgodny z działalnością dydaktyczną prowadzoną na Wydziale Elektrycznym ZUT w Szczecinie. Autor opublikował kilka prac związanych z analizą i projektowaniem współczesnych instalacji elektrycznych, w tym oświetleniowych, które spełniają wymagania prawne i techniczne w zakresie szeroko pojętej efektywności energetycznej.

Łącznie po obronie doktoratu opublikowałem 46 (w tym 18 jedno autorskich) prac naukowych z listy *MNiSW* o łącznej liczbie punktów 531 z czego własnych 280 (obliczonych przy równym podziale punktów z uwzględnieniem ilości współautorów), uzyskałem 4 patenty, jestem współautorem 1 kolejnego zgłoszenia patentowego.

Prace indeksowane w bazie *Web of Science*: 20 artykułów w czasopismach (9 zagranicznych, 11 krajowych), 1 artykuł konferencyjny zagraniczny oraz 3 artykuły konferencyjne krajowe.

Według bazy *Web of Science*, na podstawie 24 prac łącznie cytowanych 152 razy (w tym 75 bez autocytowań), *h-indeks* wynosi 8 (ResearcherID: G-6765-2016).

Według *Journal Citation Reports* sumaryczny *IF* (w roku publikowania) wynosi 8,244.

Według bazy *SCOPUS*, na podstawie 33 prac łącznie zacytowanych 200 razy (w tym 60 bez autocytowań), *h-indeks* wynosi 10 (bez autocytowań *h-indeks* wynosi 5).

Według *Google Scholar*, na podstawie 60 prac łącznie zacytowanych 427 razy, *h-indeks* wynosi 12.

